

**Viabilidad técnica y económica del sistema de aprovechamiento de agua lluvia en la
ciudad de Santiago de Cali**

Proyecto de profundización

Elaborado por:

David Buchelli Narváez

Código estudiantil: 1903608

Tutor:

Arquitecto PhD. Kimmel Chamat Garcés

Marzo 2024

Universidad del Valle, Escuela de Arquitectura, Sede Cali

Maestría en Arquitectura y Urbanismo, Énfasis en Arquitectura Bioclimática

Palabras Clave

Captación de agua lluvia

Almacenamiento de agua lluvia

Purificar agua lluvia

Costo de ciclo de vida

Rainwater harvesting

Rainwater storage

Rainwater purification

Life cycle cost

Resumen

Debido al excesivo consumo y desperdicio de agua potable en la ciudad de Santiago de Cali, que se deriva por la falta de planificación de las construcciones nuevas y las existentes, se plantea en este trabajo un sistema rentable que optimice la captación, almacenamiento y purificación del agua lluvia en viviendas existentes en la ciudad Santiago de Cali.

Los mecanismos de recolección que se propongan alrededor del territorio colombiano beneficiarán al medio ambiente, ya que tendríamos una disminución en la contaminación del recurso natural (agua), evitar la contaminación de escorrentías y, así mismo se garantizará el suministro del agua y reducción en los costos de los servicios públicos.

El proyecto se enfoca en presentar un modelo de sistema de recolección de agua lluvia en una vivienda unifamiliar con tres integrantes ubicada en la ciudad de Santiago de Cali, a través de 3 posibles escenarios teniendo presente disminuir el impacto del consumo de agua potable desde las fuentes públicas, que el costo/beneficio del sistema sea favorable para el hogar que instale el sistema y que puedan depender del agua lluvia para sus necesidades diarias.

La aplicación de las fórmulas para calcular el tamaño óptimo del tanque, demuestran que la lluvia es un valor constante que corresponde a la oferta, mientras que la demanda es variable y va directamente relacionada con el tamaño del tanque el cual aumenta con el consumo de agua. Por otro lado, el beneficio económico relacionado con la recolección de agua de lluvia crece con un aumento en el consumo diario de agua per cápita, pero disminuye con un incremento en la inversión inicial y el mantenimiento de los techos, tanques y equipos de purificación; la proyección del sistema es rentable si se justifica a 15 años, los costos de inversión aproximados de la propuesta ronda entre \$ 1.800.000 COP y \$ 12.000.000 COP, los de mantenimiento anuales entre \$ 140.000

COP y \$ 1.220.000 COP con una Tasa Interna de Retorno superior al 12 % representada en una buena inversión.

Due to the excessive consumption and waste of drinking water in the city of Santiago de Cali, which is derived from the lack of planning of new and existing buildings, this work proposes a cost-effective system that optimizes the collection, storage and purification of rainwater in existing homes in the city of Santiago de Cali. The collection mechanisms that are proposed around the Colombian territory will benefit the environment since we would have a decrease in the contamination of the natural resource (water), avoid the contamination of runoff, and likewise the water supply and reduction in the costs of public services will be guaranteed.

The project focuses on presenting a model of a rainwater harvesting system in a single-family house with three members located in the city of Santiago de Cali, through 3 possible scenarios, bearing in mind to reduce the impact of drinking water consumption from public sources, that the cost/benefit of the system is favorable for the household that installs the system and that they can depend on rainwater for their daily needs.

The application of the formulas for calculating the optimal tank size show that rainfall is a constant value corresponding to supply, while demand is variable and is directly related to the tank size which increases with water consumption. On the other hand, the economic benefit related to rainwater harvesting increases with an increase in daily per capita water consumption, but decreases with an increase in the initial investment and maintenance of roofs, tanks and purification equipment. The projection of the system is profitable if justified over 15 years, the approximate investment costs of the proposal are between \$ 1,800,000 COP and \$ 12,000,000 COP, the annual maintenance costs are between \$ 140,000 COP and \$ 1,220,000 COP with an Internal Rate of Return above 12 % represented in a good investment.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	3
2.1. Incremento en los costos de potabilizar el agua por aumento en su consumo	4
2.2. Racionamiento de agua en época de sequías	5
2.3. Desaprovechamiento y contaminación del recurso agua lluvia	6
2.4. Árbol de problemas.....	8
3. Objetivos de la investigación.....	10
3.1. Justificación	10
3.2. Objetivo general.....	13
3.3. Objetivos específicos	13
3.4. Árbol de objetivos.....	13
4. Marco Histórico.....	15
4.1. Antecedentes.....	15
4.2. Actualidad.....	16
5. Marco Legal	19
5.1. Leyes	19

5.2.	Resoluciones	20
5.3.	Decretos y Normas	21
6.	Estado del arte	23
6.1.	Aprovechar la captación de agua lluvia para disminuir el impacto del consumo de agua potable desde las fuentes públicas en viviendas de la ciudad de Santiago de Cali	24
6.2.	Diseñar un sistema rentable de almacenamiento de agua lluvia en viviendas existentes de la ciudad Santiago de Cali.....	26
6.3.	Suministrar constantemente agua de lluvia potable en una vivienda existente de Santiago de Cali.....	27
7.	Marco metodológico	31
7.1.	Definición de escenarios	33
7.2.	Modelo económico	35
7.3.	Metodología de dimensionamiento para tanques	37
8.	Análisis técnico y económico	40
8.1.	Exploración para la captación de agua lluvia	40
8.2.	Evaluaciones para el almacenamiento de agua lluvia.....	55
8.3.	Investigaciones de Tratamiento y purificación de agua lluvia.....	65
9.	Definición y aplicación técnica y económica.....	77
9.1.	Definición y aplicación de cubiertas para la recolección de agua lluvia	77

9.2.	Definición de almacenamiento de agua lluvia.....	81
9.3.	Definición técnica del tratamiento y purificación	96
10.	Análisis de viabilidad financiera	101
10.1.	Estudio financiero para la factibilidad del proyecto	101
10.2.	Proyección	101
11.	Resultados	106
11.1.	Captación de agua e impacto en el consumo de agua potable desde fuentes públicas	106
11.2.	Diseño del sistema rentable de almacenamiento de agua lluvia	108
12.	Conclusiones	133
13.	Lista de referencias.....	137

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Viabilidad económica</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2. Escenarios propuestos</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3. Milímetros de agua anuales en los 32 municipios de Colombia</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4. Rangos de los Milímetros de agua anuales.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5. Precipitación media mensual en Cali, Colombia</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 6. Coeficientes de esorrentía.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7. Resumen del análisis de cubiertas</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Promedios de consumo básico de agua en Colombia</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 9. Consumo persona línea base (L)</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 10. Consumo persona línea base (m³).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 11. Consumo persona ahorradora (L)</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 12. Consumo persona ahorradora (m³)</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 13. Consumo agua de una persona (L)</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 14. Consumo agua de una persona (m³)</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 15. Resumen del análisis de tanques.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 16. Resumen del análisis de tratamiento y purificación.....</i>	<i>75</i>

<i>Tabla 17. Datos para captación de agua lluvia en 3 escenarios.....</i>	<i>79</i>	<i>x</i>
<i>Tabla 18. Precipitación y Oferta mensual de agua lluvia en 3 escenarios.....</i>	<i>79</i>	
<i>Tabla 19. Resumen costos cubiertas escenario 1 al 3</i>	<i>80</i>	
<i>Tabla 20. Evaluación económica escenario 1, 2 y 3</i>	<i>81</i>	
<i>Tabla 21. Consumo y costos del agua potable por persona línea base, escenario 1</i>	<i>82</i>	
<i>Tabla 22. Datos para captación de agua lluvia, escenario 1</i>	<i>82</i>	
<i>Tabla 23. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 1</i>	<i>83</i>	
<i>Tabla 24. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 1</i>	<i>83</i>	
<i>Tabla 25. Captación mensual de agua lluvia en escenario 1</i>	<i>84</i>	
<i>Tabla 26. Tanque óptimo escenario 1.....</i>	<i>84</i>	
<i>Tabla 27. Porcentaje de captación del tanque óptimo escenario 1</i>	<i>85</i>	
<i>Tabla 28. Captación mensual con tanque deseado en escenario 1</i>	<i>85</i>	
<i>Tabla 29. Resumen costos tanques escenario 1</i>	<i>86</i>	
<i>Tabla 30. Resumen costos ajustado escenario 1</i>	<i>86</i>	
<i>Tabla 31. Resumen costos mantenimiento tanques escenario 1</i>	<i>86</i>	
<i>Tabla 32. Consumo y costos del agua potable por persona familia ahorradora, escenario 2</i>	<i>87</i>	
<i>Tabla 33. Datos para captación de agua lluvia, escenario 2</i>	<i>88</i>	
<i>Tabla 34. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 2</i>	<i>88</i>	

<i>Tabla 35. Captación mensual de agua lluvia en escenario 2</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 36. Tanque óptimo escenario 2.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 37. Porcentaje de captación del tanque óptimo escenario 2</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 38. Captación mensual con tanque deseado en escenario 2</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 39. Resumen costos tanques escenario 2</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 40. Resumen costos ajustado escenario 2</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 41. Resumen costos mantenimiento tanques escenario 2</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 42. Consumo y costos del agua potable por persona familia ahorradora, escenario 3</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 43. Datos para captación de agua lluvia, escenario 3</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 44. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 3</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 45. Captación mensual de agua lluvia en escenario 3</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 46. Tanque óptimo escenario 3.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 47. Porcentaje de captación del tanque óptimo escenario 3</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 48. Captación mensual con tanque deseado en escenario 3</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 49. Resumen costos tanques escenario 3</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 50. Resumen costos ajustado escenario 3</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 51. Resumen costos mantenimiento tanques escenario 3</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 52. Resumen costos PTALL escenario 1 y 2.....</i>	<i>98</i>

<i>Tabla 53. Resumen costos mantenimiento PTALL escenario 1 y 2</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 54. Resumen costos potabilización escenario 3</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 55. Resumen costos mantenimiento potabilización escenario 3.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 56. Inversión inicial escenario 1.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 57. Rentabilidad escenario 1</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 58. Inversión inicial escenario 2.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 59. Rentabilidad escenario 2</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 60. Inversión inicial escenario 3.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 61. Rentabilidad escenario 3</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 62. Resumen costos tanques IBC escenario 1</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 63. Resumen costos mantenimiento tanques IBC escenario 1</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 64. Inversión inicial tanques IBC escenario 1</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 65. Rentabilidad tanques IBC escenario 1.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 66. Resumen costos tanque concreto escenario 1</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 67. Resumen costos mantenimiento tanques concreto escenario 1</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 68. Inversión inicial tanque concreto escenario 1</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 69. Rentabilidad tanque concreto escenario 1</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 70. Resumen costos tanques IBC escenario 2</i>	<i>116</i>

<i>Tabla 71. Resumen costos mantenimiento tanques IBC escenario 2</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 72. Inversión inicial tanques IBC escenario 2</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 73. Rentabilidad tanques IBC escenario 2.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 74. Resumen costos tanque concreto escenario 2</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 75. Resumen costos mantenimiento tanque concreto escenario 2</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 76. Inversión inicial tanque concreto escenario 2</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 77. Rentabilidad tanque concreto escenario 2</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 78. Resumen costos tanques IBC escenario 3</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 79. Resumen costos mantenimiento tanques IBC escenario 3.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 80. Inversión inicial tanque IBC escenario 3.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 81. Rentabilidad tanque IBC escenario 3 (2023).....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 82. Resumen costos tanques superficiales escenario 3</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 83. Resumen costos mantenimiento tanques superficiales escenario 3 (.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 84. Inversión inicial escenario 3.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 85. Rentabilidad tanque superficiales escenario 3.....</i>	<i>129</i>

Lista de figuras

Figura 1. Metros cuadrados de construcción	7
Figura 2. Árbol de problemas.....	8
Figura 3. Consumos sustituibles por agua de lluvia	11
Figura 4. Árbol de objetivos	13
Figura 5. Regeneración de cuencas	15
Figura 6. Collage captación agua lluvia	16
Figura 7. Sistemas de recolección de agua lluvia	17
Figura 8. Sistema básico de recolección agua lluvia	23
Figura 9. Marco metodológico	31
Figura 10. Localización vivienda un piso barrio Vipasa – Santiago de Cali.....	33
Figura 11. Esquema distribución de agua lluvia para los escenarios según el consumo.....	35
Figura 12. Cálculo del volumen de agua lluvia	42
Figura 13. Precipitación media mensual en Cali, Colombia	43
Figura 14. Esquema de sistema de recolección de agua lluvia - Cubierta	44
Figura 15. Captación - Área de techo.....	46
Figura 16. Teja asfáltica.....	47

<i>Figura 17. teja fibrocemento, teja termoacústica</i>	<i>51</i>
<i>Figura 18. Teja de concreto.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19. Canaleta con rejilla</i>	<i>54</i>
<i>Figura 20. Esquema de sistema de recolección de agua lluvia - Almacenamiento</i>	<i>60</i>
<i>Figura 21. Tipos de tanques</i>	<i>61</i>
<i>Figura 22. Tanque de almacenamiento de agua</i>	<i>63</i>
<i>Figura 23. Tanque cisterna 1000 litros</i>	<i>63</i>
<i>Figura 24. Esquema de sistema de recolección de agua lluvia - Tratamiento</i>	<i>66</i>
<i>Figura 25. Diagrama osmosis inversa</i>	<i>69</i>
<i>Figura 26. Filtros 4 etapas osmosis inversa</i>	<i>70</i>
<i>Figura 27. Esquema de ozonificación.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 28. Purificador de agua ozonificador</i>	<i>72</i>
<i>Figura 29. esquema UV.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 30. Lámpara germicida de Luz Ultravioleta</i>	<i>74</i>
<i>Figura 31. Modelo Kit planta de tratamiento de agua lluvia.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 32. Cubierta en asfalto.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 33. Volumen de separación variable</i>	<i>80</i>
<i>Figura 34. Comparación del consumo por persona en vivienda.....</i>	<i>96</i>

<i>Figura 35. Modelo planta de tratamiento de agua lluvia.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 36. Filtros 4 etapas osmosis inversa + Purificador de agua.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 37. Modelo 3D caso de estudio</i>	<i>106</i>
<i>Figura 38. Planta de cubiertas caso de estudio</i>	<i>106</i>
<i>Figura 39. Sistema recolección agua lluvia en caso de estudio.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 40. Sistema almacenamiento agua lluvia en caso de estudio escenario 1</i>	<i>108</i>
<i>Figura 41. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 1</i>	<i>109</i>
<i>Figura 42. Tanque IBC cuadrado</i>	<i>109</i>
<i>Figura 43. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques IBC caso de estudio escenario 1</i>	<i>111</i>
<i>Figura 44. Sistema almacenamiento agua lluvia tanque concreto escenario 1.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 45. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 2</i>	<i>115</i>
<i>Figura 46. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques IBC caso de estudio escenario 2</i>	<i>117</i>
<i>Figura 47. Sistema almacenamiento agua lluvia tanque concreto escenario 2.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 48. Sistema almacenamiento agua lluvia tanque concreto escenario 2.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 49. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 3.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 50. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 3</i>	<i>123</i>
<i>Figura 51. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques IBC caso de estudio escenario 3</i>	<i>125</i>
<i>Figura 52. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques 220 L escenario 3.....</i>	<i>127</i>

<i>Figura 53. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques 220 L escenario 3.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 54. Sistema purificación agua lluvia caso de estudio escenario 1</i>	<i>130</i>
<i>Figura 55. Sistema purificación agua lluvia caso de estudio escenario 2</i>	<i>131</i>
<i>Figura 56. Sistema purificación agua lluvia caso de estudio escenario 3</i>	<i>131</i>

1. Introducción

La vulnerabilidad de los recursos hídricos en Colombia dada la grave afectación del cambio climático conlleva a realizar diferentes estudios elaborados por instituciones nacionales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para conservar y mantener el régimen hidrológico y prever las alteraciones climáticas, que de no actuar a tiempo, resultaría en la escasez de la disponibilidad del agua con consecuencias perjudiciales para todos los ecosistemas (Yajaira & Herrera, 2019). En línea con lo anterior, la demanda creciente sobre los recursos hídricos está propiciando asimismo las restricciones de agua, situación que se puede prevenir con el uso eficiente, responsable y equilibrado de la misma en nuestras actividades cotidianas, y también alivianarla con el uso de sistemas de recolección de agua lluvia, o de lo contrario mientras la demanda del agua aumente, la oferta seguirá disminuyendo, tal como lo identifica el ENA-18 (Peralta Mahecha et al., 2021)

Partiendo del problema de la carencia de mecanismos de recolección de agua lluvia y consumo excesivo de agua potable en viviendas del territorio colombiano, el documento plantea tres causas y tres efectos, los cuales se desarrollarán en el transcurso del documento como ejes transversales, explicando a su vez, los componentes principales del sistema de recolección de agua lluvia, también presentando el consumo excesivo de agua potable, aumento de los costos de vida y contaminación de las fuentes hídricas, para lo cual se plantea la justificación estableciendo unos fines y medios para resolver el problema principal, dichos fines son los objetivos específicos que siguiendo los ejes transversales se resolverán en los temas de captación, almacenamiento y purificación del agua lluvia.

A continuación, se expone el marco histórico y las leyes que soportan el uso eficiente y ahorro de agua, el control sobre el agua, los cobros sobre el agua potable, la captación del agua lluvia, y la calidad del agua que se requiere para el consumo en un hogar colombiano. El estado del arte dispone algunas teorías y estudios realizados por otros autores que han desarrollado cada parte del sistema de recolección de agua lluvia para optimizar la propuesta de un sistema de recolección de agua lluvia rentable.

De acuerdo con la metodología de desarrollo del trabajo de grado, se definen los escenarios que plantean el consumo de una persona en diferentes situaciones para poder evaluar la rentabilidad de un sistema de agua lluvia en Santiago de Cali, también se explica el modelo económico y la metodología para dimensionar un tanque de recolección de agua lluvia, debido a que este es el componente principal para el éxito del sistema de recolección.

Finalmente, el documento se resume en el análisis técnico y económico de cada componente del sistema teniendo en cuenta los ejes transversales que se plantearon desde el inicio. Analizando la demanda y oferta del agua en una vivienda estrato 4 en la ciudad de Santiago de Cali, se define y aplica en el caso de estudio los elementos óptimos por cada escenario planteado en la metodología, procurando una viabilidad económica que soporte el uso eficiente del sistema de recolección de agua lluvia. En el capítulo de resultados, se identifica el diseño del sistema de recolección por cada escenario y propuestas de diseños de tanques con la respectiva viabilidad económica.

2. Planteamiento del problema

El principal problema hoy es la carencia de mecanismos de recolección de agua lluvia y consumo excesivo de agua potable en viviendas del territorio colombiano. En los últimos años, se realizaron estudios del impacto sobre la respuesta hidrológica y reportó incrementos en los fenómenos de El Niño y La Niña incluso en su intensidad convirtiéndose cada vez más extremos afectando los recursos hídricos (García et al., 2012). Otro inconveniente proviene del excesivo consumo y desperdicio de agua potable desde las fuentes municipales ocasionadas por la población consumista en especial en los estratos altos (Granada Carvajal, 2011), agravando la afectación de los recursos hídricos, las construcciones actuales no poseen mecanismos para almacenar el agua lluvia, y en el mejor de los casos cuando si lo tienen, no son para uso de consumo humano (CCCS, 2021).

Sumado al problema anterior, Farreny (2011) afirma que hay pocos estudios sobre la importancia de la viabilidad económica de los sistemas de recolección de agua lluvia y deduce que la mayoría de las investigaciones se basan en el nivel de viviendas unifamiliares campestres, porque la mayoría de los sistemas que se han instalado tradicionalmente en este tipo de viviendas se debe a la disponibilidad de amplias áreas de captación y espacio para el sistema de almacenamiento de agua lluvia (tabla 1).

Haciendo parte de las investigaciones que han realizado varios autores sobre la recolección de agua lluvia con enfoques económicos y tomando la metodología que propone Farreny, en el presente trabajo el caso de estudio será en la ciudad Santiago de Cali – Colombia, en una vivienda unifamiliar estrato 4 como punto de referencia y aplicarlo en otras ciudades y otros estratos del país.

Tabla 1. *Viabilidad económica*

Referencia	Escala ^a	Ubicación (lluvia promedio mm/año)	Tiempo ^b	Enfoque de la investigación	r (%)	t (años)
Liaw and Tsai (2004)	U	3 ciudades en Taiwán (rango de 1755 a 3350)	R	Determinación del volumen óptimo de almacenamiento de tanques de agua de lluvia, considerando aspectos económicos	5	15
Roebuck et al. (2010)	U	West Yorkshire, Reino Unido (~700)	N	Costos del ciclo de vida (LCC) de RWH	3,5 5 10 15	5 10 25 50
Tam et al. (2010)	U	7 ciudades en Australia (rango de 520 a 1597)	N	Costos de RWH en comparación con otras alternativas de suministro de agua	3	20
Ghisi and Mengotti de Oliveira (2007)	U	Florianópolis, Brasil (1706)	R	Combinación de sistemas de aguas grises y RWH	1 5 10	
Mitchell et al. (2005)	U, Nb	Melbourne, Australia (800)	N	El papel de las aguas pluviales como sustituto del agua potable	5,2	50
Zhang et al. (2009)	M	4 ciudades en Australia (rango de 800 a 1600)	N	Viabilidad de RWH en edificios de gran altura (período de recuperación)	6,5	
Rahman et al. (2010)	M	Sydney, Australia (1200)	N	Determinación del escenario de RWH más sostenible para edificios de varios pisos (LCC)	5 7,5 10	60
Ghisi and Ferreira (2007)	M	Florianópolis, Brasil (1706)	N	Combinación de sistemas de aguas grises y RWH (período de recuperación)		
R. Farreny et al. (2011)	M, Nb					
Şahin, N. İpek et al. (2019)	M					

^a Escala de infraestructuras: U= edificio unifamiliar, M= edificio multifamiliar, Nb= nivel de vecindario

^b Tiempo de implementación: N= nueva construcción, R= acción de actualización

Nota: elaboración propia (2023)

2.1. Incremento en los costos de potabilizar el agua por aumento en su consumo

Como presenta Salazar Adams (Salazar Adams & Pineda Pablos, 2010) refiriéndose al texto de Baumann, D., y J. Boland. 2005. “The Case for Managing Urban Water” debido a la falta de disponibilidad de agua y escases en tiempo de sequías, no solo es necesario el abastecimiento responsable de agua, sino también el manejo y cuidado de las redes, viendo la necesidad de generar un cobro monetario adicional para dotar de agua a la población con tarifas determinadas que promuevan un uso adecuado del recurso por la preocupación creciente en cuestiones medioambientales, además, los costos de potabilización están directamente relacionados a la continuidad y cobertura requerido por el sistema de acueducto influyendo en el costo final de la factura del servicio público. En Colombia existe el Decreto 1077 de 2015 que reglamenta el sector

vivienda, ciudad y territorio, dentro del cual regula el medio ambiente, en junio de 2018 el Decreto No. 1090 adiciona una subsección en el cual decreta el programa para el uso eficiente y ahorro del agua (PUEAA), donde se destaca el buen uso y los programas para la optimización del recurso natural y el control de pérdidas, y el 24 de abril de 2019 con el Decreto 673 con el cual incrementan el uso eficiente y ahorro de agua. Dicha normativa permite a las entidades regular el cobro cuando se excede el consumo promedio de cada región¹. Con este preámbulo se entiende que una de las causas del problema principal es el consumo excesivo de agua potable en viviendas residenciales por los malos hábitos de los colombianos (Betancourt Rojas & Rodríguez Villalba, 2019) llevando a un aumento en las tarifas del servicio público del agua (Sahin et al., 2017)

2.2. Racionamiento de agua en época de sequías

Los objetivos de desarrollo sostenible de La Asamblea General de las Naciones Unidas adoptadas en 2015 para la agenda de 2030 así como el “Estudio Nacional del Agua 2022” del IDEAM, los cuales procuran proteger el recurso hídrico para determinar situaciones actuales, y a futuro sobre el recurso del agua en épocas de sequía, estos eventos naturales se asocian a las bajas precipitaciones temporales o recurrentes impactando los recursos hídricos dependiendo de la intensidad y duración de los acontecimientos de los fenómenos del Niño y la Niña (IDEAM, 2022)

¹ ABC DISMINUCIÓN CONSUMO BÁSICO DE AGUA - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de

En Colombia nos hemos visto afectados por la sequía que resulta del fenómeno de La Niña “un peligro natural único que a través de sus características multifacéticas causa daños a la ecología y la economía” (Bandyopadhyay et al., 2020) para entender este fenómeno y la forma en que llueve en el país contamos con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual almacena datos de lluvia, entre otros aspectos ambientales, día tras día nos da claridad sobre las variaciones de la distribución de la precipitación y la disponibilidad de agua en Colombia durante las diversas fases del fenómeno (Navarro-Monterroza et al., 2019)

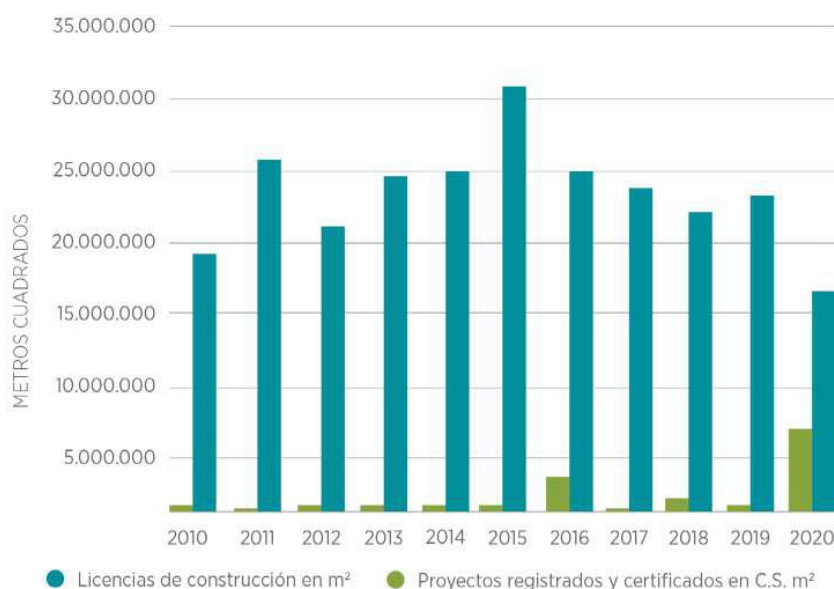
Por otra parte, a nivel regional en las zonas urbanas y rurales, el uso constante y excesivo del agua potable en los baños, cocinas, jardines (riego) y aseo, no solo tiene impactos negativos sobre el recurso hídrico, sino también sobre la electricidad y alimentación (de Macedo et al., 2019) impidiendo llevar una vida saludable para la población colombiana, (Britto et al., 2019) el gobierno y el IDEAM procuran proteger el recurso hídrico actual para prever situaciones adversas en el futuro, y garantizar que cada ciudadano tenga un acceso confiable a cantidades suficientes de agua potable, por ende, la consecuencia del uso inadecuado o abuso del agua potable es el racionamiento obligatorio de este recurso y la afectación a los alimentos y energías del país.

2.3.Desaprovechamiento y contaminación del recurso agua lluvia

Las viviendas que no cuentan con un sistema de recolección de agua lluvia desaprovechan el recurso no renovable, aumenta la presión sobre las fuentes tradicionales de abastecimiento, incrementan las escorrentías y las contaminan. En Colombia el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) con 15 años de liderazgo en desarrollo de proyectos sostenibles, está aliado con Global Alliance for Buildings and Construction, World Green Building Council, Green Business Certification Inc. (GBCI) para el Programa LEED (por sus siglas en inglés,

Leadership in Energy & Environmental Design), los cuales certifican edificios sostenibles, en su portafolio ya cuentan con 151 edificios certificados (2.3 millones m²), 223 en proceso (3.9 millones m²) datos al 31 diciembre de 2018 (CCCS, 2019) en comparación con los permisos otorgados en las curadurías del país, en la figura 1 se observa la disminución de construcciones durante el año 2020 (CCCS, 2021) debido a la situación atípica de pandemia, no obstante, refleja un aumento en las construcciones sostenibles respecto a años anteriores, aun así, se considera una cantidad baja de construcciones sostenibles versus construcciones sin certificación. Dentro de la tabla de calificación de LEED, la recolección de agua lluvia representa el 10 % de la certificación, si los edificios residenciales que solicitaron o van a solicitar licencia de construcción en Colombia emplearan un sistema de recolección de agua lluvia, poco a poco se generaría un cambio en la forma de pensar y actuar de la sociedad, además de aprovechar las escorrentías y harían parte de las viviendas sostenibles (Palla et al., 2017)

Figura 1. Metros cuadrados de construcción



Nota: Evolución de los proyectos registrados y certificados en construcción sostenible

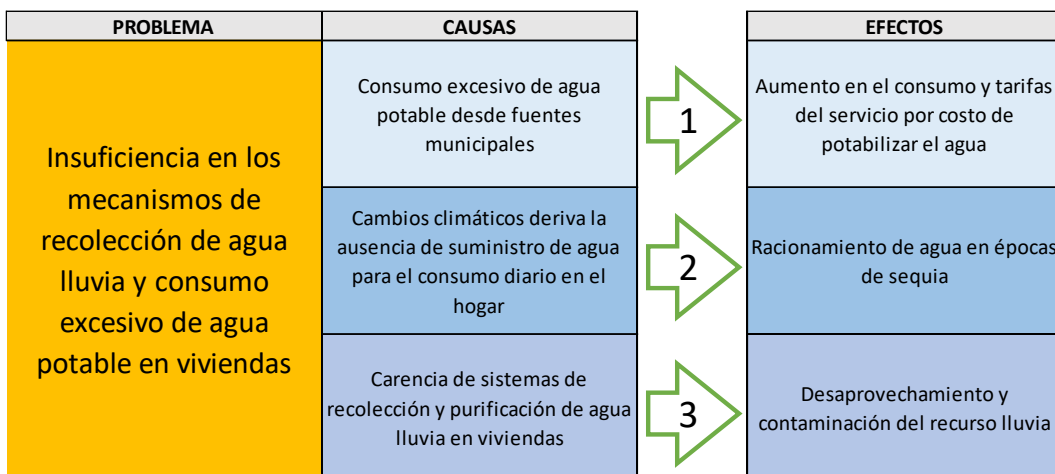
con respecto a los proyectos licenciados en los últimos diez años. (Estado de la construcción sostenible 2021 CCCS)

La contaminación del agua que se origina por no tener un sistema de recolección de agua lluvia, inicia desde la captación de agua lluvia, la cual al caer sobre los tejados y calles de la ciudad contaminándose fácilmente con basura, aceites, químicos, bacterias, metales pesados y en algunos casos con las aguas residuales deteriorando gravemente su calidad (Ulacia Balmaseda, 2014), el agua potable termina en el sistema de alcantarillado junto con las aguas residuales, aumentando la contaminación y así mismo desechando este recurso natural. Otro efecto negativo de no tratar el agua lluvia a nivel de ciudad e individualmente por cada vivienda, es contaminar el agua potable en labores diferentes al consumo humano como por ejemplo el lavado de pisos, la descarga del inodoro o el riego de jardines (Torres & Nieto, n.d.) parte de esta situación se solventa si el agua potable proveniente de la entidad pública prestadora del servicio, solo se usara en consumo humano y el agua de lluvia en descargas de inodoros y riego de jardines.

2.4. Árbol de problemas

Gráficamente se identifican 3 causas principales del problema acompañados de sus efectos.

Figura 2. Árbol de problemas



Nota: Elaboración propia, (2023).

3. Objetivos de la investigación

3.1. Justificación

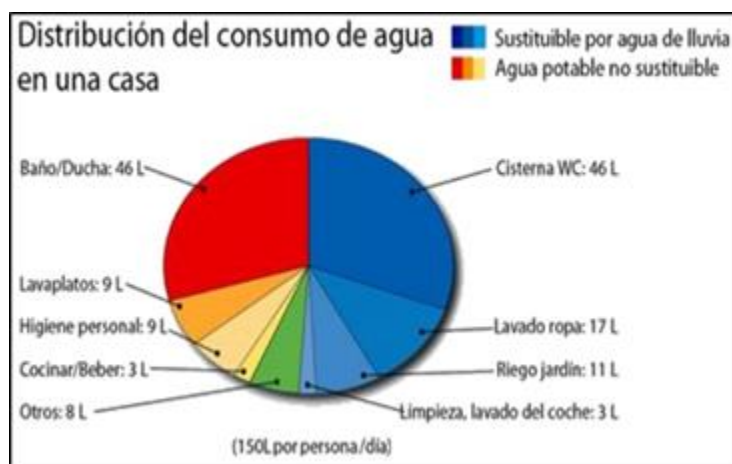
En general los malos hábitos de los colombianos hace que se aumente los niveles de consumo de agua potable dentro de las viviendas (Betancourt Rojas & Rodríguez Villalba, 2019) y por ende el aumento de las tarifas del servicio reflejado en las facturas públicas (Sahin et al., 2017). Por lo tanto, con este incremento de los costos relacionados al gasto del agua, los consumidores se ven en la obligación de seguir políticas y hábitos de ahorro en especial en periodos de estrés (Roibas et al., 2019) para empezar a reducir el consumo excesivo, tener un uso eficiente del agua y evitar el corte del suministro del agua (Cano Ortega, 2019). Cuando se presentan casos de emergencias por sequias (periodos de estrés) el racionamiento es obligado y formulado desde las empresas de acueducto, para estos casos la lluvia es considerada como una fuente de abastecimiento del recurso hídrico, por lo tanto, es muy importante prever dicha situación de racionamiento a través del auto suministro de agua en las viviendas desde los techos de las mismas (Susca, 2019) con base en lo anterior, la solución está en el diseño de un sistema que optimice la recolección (captación, almacenamiento, reutilización) y purificación de agua lluvia en las viviendas para reducir el consumo diario de agua potable.

Aunque existen modelos para reutilizar el agua, como por ejemplo recolectar el agua de la ducha, lavamanos, lavaplatos, de la lavadora o de la lluvia para usarla en el riego de plantas o vaciar el inodoro, existen otros modelos más tecnificados como el tratamiento de agua lluvia o tratamiento de aguas grises, o la mezcla de estos dos sistemas cuando el agua es muy escasa, en este trabajo nos centraremos en la recolección de agua lluvia y el tratamiento para potabilizarla, debido a que los modelos más sencillos solo permite reutilizar el agua para el abastecimiento de

dos usos como es el riego de las matas y vaciar el inodoro, mientras que el sistema de tratamiento de aguas grises es más costoso y complejo que el de aguas lluvias, además la recolección y tratamiento de agua lluvia se puede aplicar en viviendas con elementos asequibles y económicos.

Los sistemas de recolección de agua lluvia no son comunes en Colombia como método para ahorrar agua, usualmente por el desconocimiento de su aplicación y de las normas y leyes relacionadas que benefician a los que lo emplean, los limitados incentivos económicos y la falta de conciencia ciudadana (Słyś & Stec, 2020) así como el convencimiento de que tenemos abundantes recursos hídricos inagotables. Sin embargo, algunos investigadores como Torres (Hugues, 2019) enfatiza que la lluvia es una alternativa eficaz y adecuada para reducir el consumo de agua potable en el hogar, porque al captarla y almacenarla puede ser utilizarla para fines relevantes como se indica en la figura 4, estos son algunos consumos domésticos en los cuales, por lo menos, 77 litros de agua al día de 150, son perfectamente sustituibles por agua de lluvia. La otra mitad del consumo de agua se puede suplir con sistemas de limpieza y potabilización.

Figura 3. Consumos sustituibles por agua de lluvia



Nota: tomado de “La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente (2022)

La recolección de agua lluvia se presenta como una estrategia sostenible para ser incluida en la gestión del ciclo urbano del agua (Sazakli et al., 2007) presentando beneficios tales como reducir la demanda y por tanto la escasez de agua, el deterioro de las fuentes hídricas, previene de inundaciones, evita la contaminación del agua, escorrentías y afectación en sistemas de drenajes. Actualmente algunos países aprovechan como fuente alternativa la recolección de agua lluvia casero (Calvache Escobar et al., 2019) en otros lugares, denotan mayor interés en el uso estos sistemas tecnificados para el suministro y aumentar la capacidad de agua potable actual (Mitchell et al., 2005)

Por otra parte, Farreny (2011) basado en otros autores indica que es necesario proporcionar criterios para la difusión de los sistemas de recolección de agua lluvia, teniendo en cuenta que la aplicación adecuada de los principios económicos a los problemas ambientales es esencial para identificar e implementar las soluciones más rentables y avanzar hacia estrategias sostenibles para la gestión del agua urbana. También sugiere, que la mayor consideración en la decisión de instalar uno de estos sistemas radica en términos de costos y beneficios financieros, quedando los problemas sobre la aceptabilidad pública y la calidad del agua. Por esta razón, es sumamente importante determinar la viabilidad económica de los sistemas de recolección de agua lluvia.

Reflexión: “La gestión del agua en las ciudades es crucial ya que su uso actual del agua está lejos de ser sostenible” (Sazakli et al., 2007)

3.2. Objetivo general

Optimizar la recolección y purificación de agua lluvia en viviendas estrato 4 con 3 integrantes para consumo diario de agua potable y evaluar su rentabilidad en Santiago de Cali - Colombia

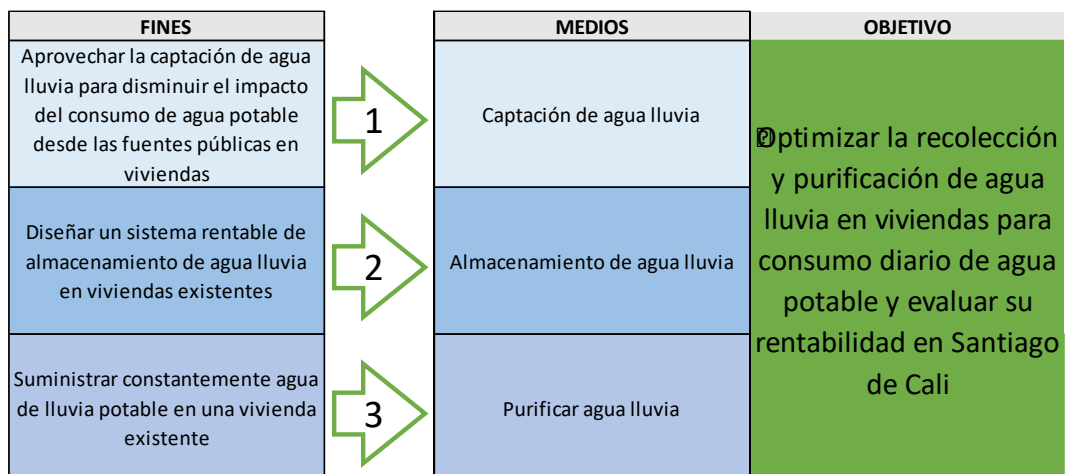
3.3. Objetivos específicos

- Aprovechar la captación de agua lluvia para disminuir el impacto del consumo de agua potable desde las fuentes públicas en viviendas de la ciudad de Santiago de Cali
- Presentar un diseño de sistema rentable de almacenamiento de agua lluvia en viviendas existentes de la ciudad de Santiago de Cali.
- Suministrar constantemente agua de lluvia potable en una vivienda existente en la ciudad de Santiago de Cali

3.4.Árbol de objetivos

Los fines son aquellos que dan respuesta a las causas del problema que a su vez son los objetivos específicos, y los medios la manera de resolverlos, dando solución al objetivo general.

Figura 4. Árbol de objetivos



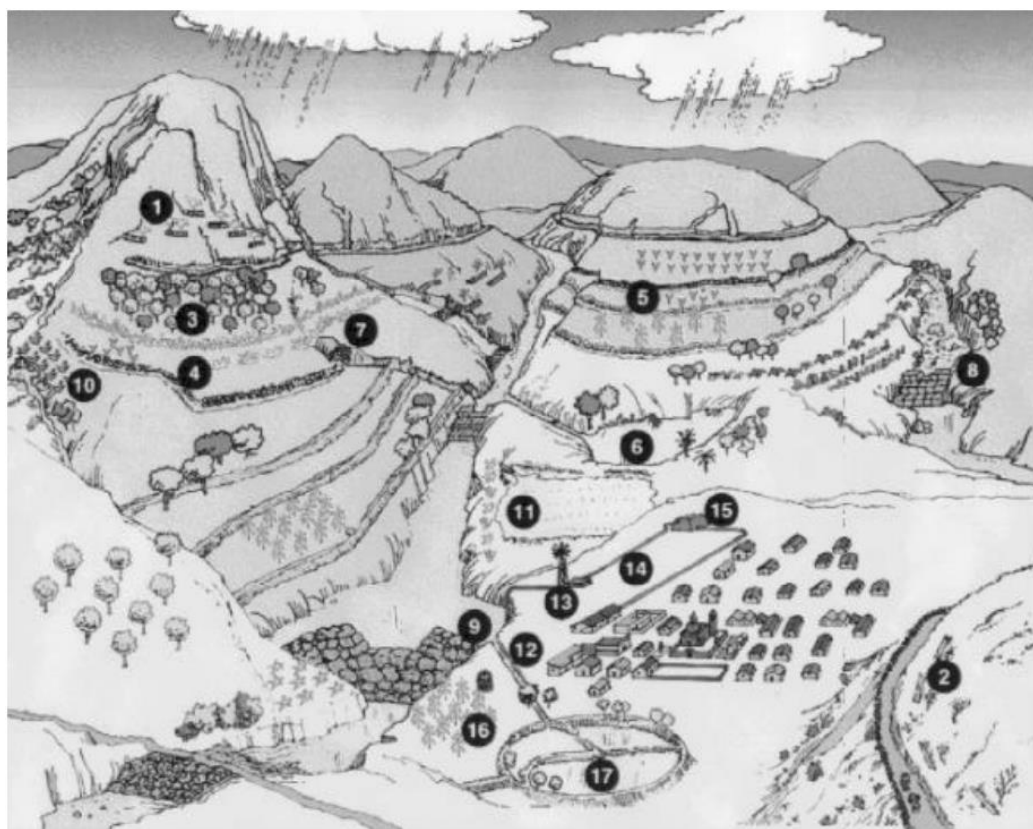
Nota: Elaboración propia, (2023).

4. Marco Histórico

4.1. Antecedentes

La captación del agua de lluvia como mecanismo de obtención de agua para el consumo humano y otras labores se presenta desde tiempos ancestrales. En diferentes partes del planeta, se han concebido soluciones para el problema de la disponibilidad de agua considerando este recurso. Como evidencia de lo anterior se muestran los ejemplos más significativos a nivel mundial.

Figura 5. Regeneración de cuencas



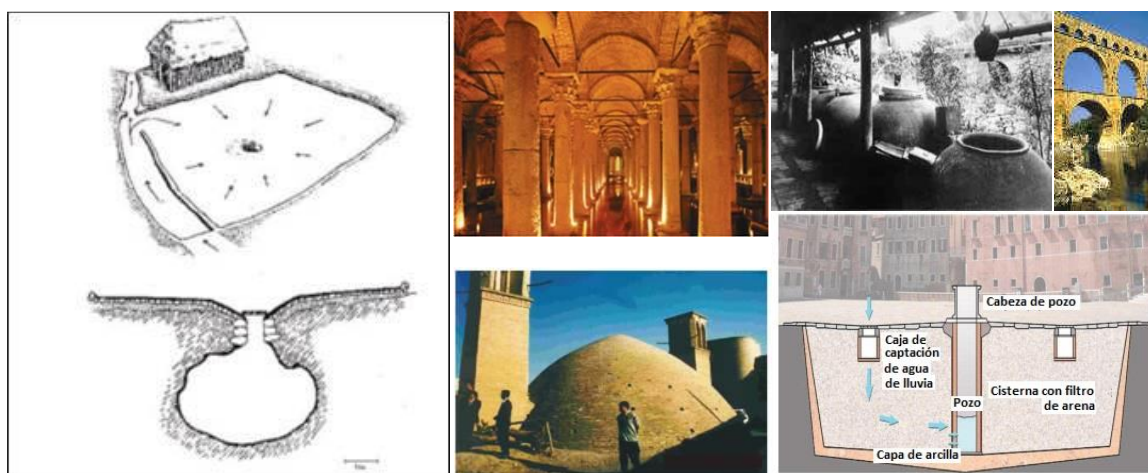
(89) Regeneración de cuencas.

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 Zanja trinchera | 7 Presa de piedra acomodada | 13 Rehilete |
| 2 Anillos de captación | 8 Presa de gaviones | 14 Tubería |
| 3 Reforestación | 9 Presa derivadora | 15 Tanque |
| 4 Curvas de nivel con vegetación | 10 Manantial | 16 Pozo somero |
| 5 Terrazas | 11 Irrigación | 17 Jagüey |
| 6 Aguajes | 12 Canal de tierra | |

Nota: tomado de Agua para siempre, Raúl Hernández y Gisela Herrerías.

Los sistemas de captación de agua de lluvia, teniendo en cuenta su diversidad, tuvieron gran difusión en tiempos ancestrales, pudiéndolos encontrar en Europa, América, Asia y África, sobre todo en las regiones con escasez. Los usos más frecuentes a los que se destinó este recurso fueron domésticos, consumo humano y agrícolas, tanto en zonas rurales como urbanas. (Hugues, 2019)

Figura 6. Collage captación agua lluvia



Nota: Elaboración propia, tomado de La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente, Dr. C Ronnie Torres Hugues (2019)

4.2. Actualidad

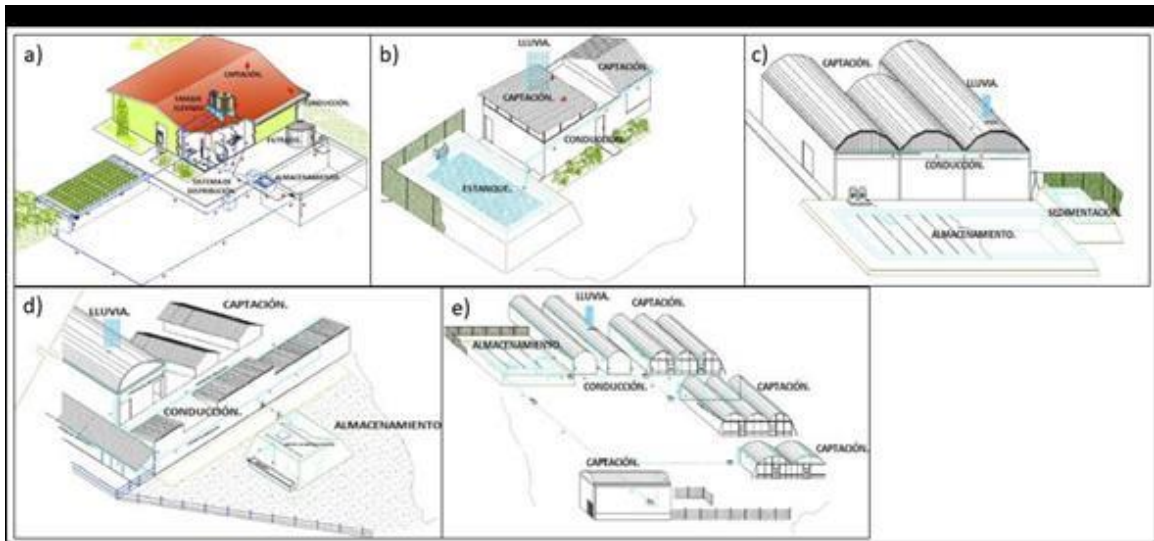
A nivel mundial el aprovechamiento del agua de lluvia se ha convertido en un incentivo para la gestión y el uso eficiente del agua. De esta forma, está siendo utilizada para una mayor variedad de fines, desde mediados del siglo XX, a raíz de la conciencia ambiental se retomó esta tecnología, incorporando materiales novedosos como ferrocemento, geomembranas y polietileno, entre otros.

Por otra parte, dado el desarrollo social se ha diversificado el uso de este recurso destinándolo no solo al consumo doméstico y agrícola, sino también para la cría de peces, lavado de autos, contra incendios, etc. Además, se ha ganado terreno en lo legislativo, donde varios países han desarrollado un amplio marco legal. Incluso globalmente se han creado organizaciones para promoverlos y otras se han dirigido a la incorporación en la arquitectura y construcción de estructuras. (Hugues, 2019)

En sentido general, Estados Unidos, Suecia, China, Japón, Australia, Indonesia, Alemania, España, Francia, Nigeria y Sudáfrica son países que lideran estas prácticas, mediante concepciones técnicas, científicas, normativas y socioeconómicas, asociadas con procesos de construcción sostenible. Del mismo modo, Brasil, México y Chile guían en Latinoamérica esta experiencia para usos no potables en conjuntos residenciales, escuelas, estaciones de servicios, parques, sistemas de riego, paisajismo y zonas duras, para lograr esto se ha recurrido a la generación de políticas de aprovechamiento, con incentivos tributarios y conciencia ambiental. De esta forma encabeza la recolección de agua de lluvia a nivel mundial (Estupiñán y Zapata 2010).

Países como Islas Vírgenes, Islas Caicos y Turkos, Tailandia y Singapur, entre otros, han desarrollado un marco legal y normativo que obliga a la captación de agua de lluvia empleando los techos (Duran et al. 2010).

Figura 7. Sistemas de recolección de agua lluvia



*Nota: Tomado de La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente,
Dr. C Ronnie Torres Hugues, (2019)*

5. Marco Legal

5.1. Leyes

373 de 1997

ARTICULO 1o. PROGRAMA PARA EL USO EFICIENTE Y AHORRO DEL AGUA.

Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Se entiende por programa para el uso eficiente y ahorro de agua el conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico. Las Corporaciones Autónomas Regionales y demás autoridades ambientales encargadas del manejo, protección y control del recurso hídrico en su respectiva jurisdicción, aprobarán la implantación y ejecución de dichos programas en coordinación con otras corporaciones autónomas que compartan las fuentes que abastecen los diferentes usos.

ARTICULO 2o. CONTENIDO DEL PROGRAMA DE USO EFICIENTE Y AHORRO DEL AGUA. El programa de uso eficiente y ahorro de agua, será quinquenal y deberá estar basado en el diagnóstico de la oferta hídrica de las fuentes de abastecimiento y la demanda de agua, y contener las metas anuales de reducción de pérdidas, las campañas educativas a la comunidad, la utilización de aguas superficiales, lluvias y subterráneas, los incentivos y otros aspectos que definan las Corporaciones Autónomas Regionales y demás autoridades ambientales, las entidades prestadoras de los servicios de acueducto y alcantarillado, las que manejen proyectos de riego y drenaje, las hidroeléctricas y demás usuarios del recurso, que se consideren convenientes para el cumplimiento del programa.

ARTICULO 5o. REUSO OBLIGATORIO DEL AGUA. Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental...

ARTICULO 9o. DE LOS NUEVOS PROYECTOS. Las entidades públicas encargadas de otorgar licencias o permisos para adelantar cualquier clase de proyecto que consuma agua, deberán exigir que se incluya en el estudio de fuentes de abastecimiento, la oferta de aguas lluvias y que se implante su uso si es técnica y económicamente viable.

5.2. Resoluciones

Resolución 2115 de 2007 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Resolución 1508 de 2010 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

Por la cual se establece el procedimiento para el recaudo de los recursos provenientes de las medidas adoptadas por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico para promover el uso eficiente y ahorro del agua potable y desestimular su uso excesivo y su respectivo giro al Fondo Nacional Ambiental (Fonam).

5.3. Decretos y Normas

Decreto 4742 de 2005 "Por el cual se modifica el artículo 12 del Decreto 155 de 2004 mediante el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas"

Cálculo del monto a pagar: El valor a pagar por cada usuario estará compuesto por el producto de la tarifa unitaria anual de la tasa por utilización de agua (TU), expresada en pesos/m³, y el volumen captado (V), expresado en metros cúbicos (m³), corregido por el factor de costo de oportunidad.

Decreto 2811 de 1974 Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente

De uso de aguas lluvias. Artículo 148: El dueño, poseedor o tenedor de un predio puede servirse de las aguas lluvias que caigan o se recojan en este mientras por él discurran. Podrán, en consecuencia, construir dentro de su propiedad las obras adecuadas para almacenarlas y conservarlas, siempre que con ellas no cause perjuicios a terceros.

Decreto 1575 de 2007 Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano

Objeto y campo de aplicación. El objeto del presente decreto es establecer el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada. Aplica a todas las personas prestadoras que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en todo el territorio nacional, independientemente del uso que de ella se haga para

otras actividades económicas, a las direcciones territoriales de salud, autoridades ambientales y sanitarias y a los usuarios.

Decreto No. 1090 de 2018 Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentarios del Sector Ambiente y desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones

Reglamenta la Ley 373 de 1997 y adiciona una subsección en el cual decreta el programa para el uso eficiente y ahorro del agua (PUEAA), donde se destaca el uso eficiente y los programas para la optimización del recurso natural y el control de pérdidas.

Decreto 673 del 24 de abril de 2019 Por el cual se adiciona un inciso al artículo 2.3. 6.3. 5. 15. de la sección 5, del capítulo 3, del título 6, de la parte 3, del libro 2, del Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 1077 del 26 de mayo de 2015, en lo relativo a las reglas de difusión en casos excepcionales

Complementa el Decreto 1077 de 2015 para que el IDEAM y la Comisión de Regularización de Agua Potable y Saneamientos Básico (CRA) orienten e incentiven el uso eficiente y de ahorro de agua

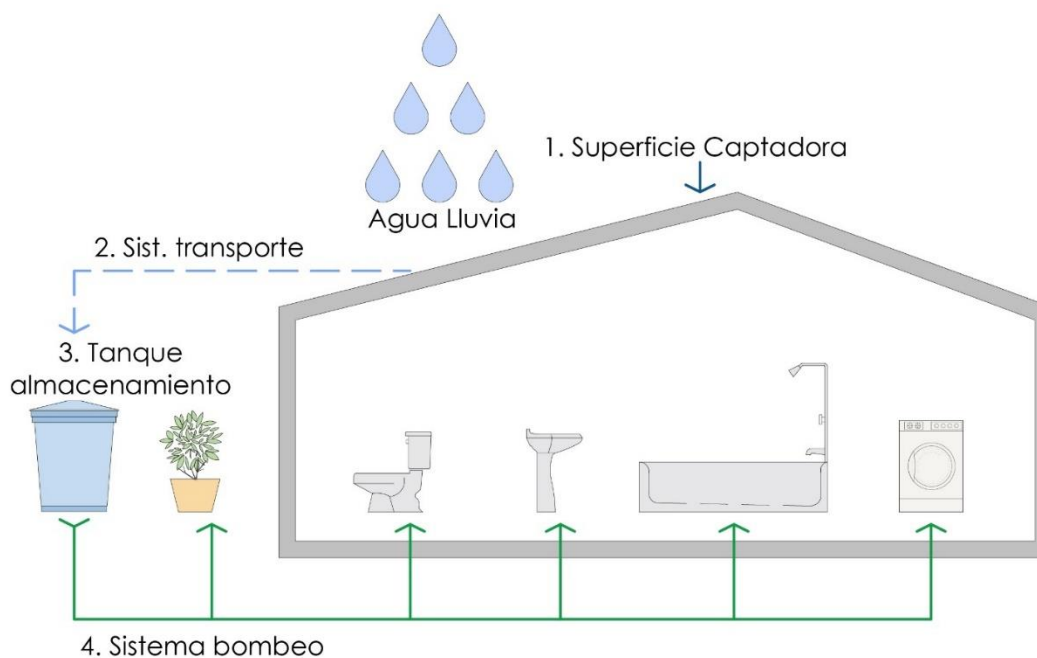
**Norma RAS: Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico
Ras - 2000**

El título A, numeral A.11.3.3 identifica los coeficientes de rugosidad de materiales. El título D, “establece las condiciones requeridas para la concepción y el desarrollo de sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y lluvias, considerados como convencionales”

6. Estado del arte

Un sistema básico de recolección de agua de lluvia incluye cuatro elementos principales: (1) una superficie de captación, (2) un sistema de transporte, que comprende canales y algunos filtros gruesos para eliminar sólidos grandes como, por ejemplo, hojas y ramitas; (3) un tanque de almacenamiento y (4) un sistema de bombeo desde el cual se envía agua a la vivienda o a otro lugar (jardines, techos verdes, etc.). Este sistema funciona de tal manera que el exceso de agua con respecto a la capacidad máxima del tanque se descarga en el sistema de alcantarillado para evitar desbordamientos del tanque. También existen sistemas mejorados que contienen un llenado de agua conectado de la red de suministro de agua potable con un controlador de nivel de agua, el cual asegura que el nivel de agua de lluvia dentro del tanque no descienda por debajo de un cierto umbral durante los períodos sin lluvia. Para sistemas más avanzados, el agua de lluvia se somete a un tratamiento adicional de filtración y desinfección para el consumo humano (Leong et al., 2017)

Figura 8. Sistema básico de recolección agua lluvia



Nota: Elaboración propia, (2023).

6.1. Aprovechar la captación de agua lluvia para disminuir el impacto del consumo de agua potable desde las fuentes públicas en viviendas de la ciudad de Santiago de Cali

Colombia posee una posición geográfica estratégica para la implementación de sistemas de recolección de aguas lluvias ya que por encontrarse en la línea ecuatorial es privilegiada en producción de agua, entre 500 y 5.000 milímetros anuales y en la región de Cali, se podrían recoger hasta 1.500 litros por metro cuadrado cada año (Reyes & Rubio, 2014) capacidad suficiente para tener sistemas descentralizados rentables en nuestro país. El problema del agua surge en la medida que la demanda del agua aumenta, tornándose insuficiente para suplir las necesidades básicas, por ende, el aprovechamiento de aguas lluvias se traduce en menores costos en las viviendas y es un aporte para la sociedad en términos ecológicos.

El reciclaje de agua en viviendas brinda soluciones sostenibles para la reutilización en fuentes de agua no convencionales, los sistemas destinados a capturar y almacenar agua de lluvia han evolucionado desde tiempos remotos y hoy en día aún pueden representar una tecnología válida para reducir la creciente demanda al suministro de agua de la red pública de distribución (Zanni et al., 2019) manteniendo los mismos elementos básicos de captación, recolección, almacenamiento y distribución (OPS et al., 2004) y en algunos casos un elemento más como lo es la purificación.

Por lo tanto tener un sistema de agua lluvia dentro de cada vivienda garantiza la reutilización del recurso natural, ya sea en una vivienda existente o en las construcciones nuevas que se diseñen de manera sustentable (CCCS, 2021) y mejor aún con estrategias como la captación de agua de lluvia para consumo humano las cuales presentan las siguientes ventajas: Alta calidad fisicoquímica del agua de lluvia, sistema independiente y por lo tanto ideal para comunidades dispersas y alejadas, empleo de mano de obra y/o materiales locales, consumo mínimo de energía para la operación del sistema, fácil de mantener, ahorro de tiempo en la recolección y el consumo para los seres humanos bajo condiciones normativas de cada país, que incluso puede llegar a tener un “ahorro de agua potable entre 14.7 % y 17.7 %” (Ghisi & Ferreira, 2007) que combinado con el sistema de aguas grises llegaría hasta el 42 %” (Ghisi & Ferreira, 2007). A su vez las desventajas de este método de abastecimiento de agua son las siguientes: Alto costo inicial que puede impedir su implementación por parte de las familias de bajos recursos económicos, y la cantidad de agua captada depende de la precipitación del lugar y del área de captación (OPS et al., 2004).

Desde la óptica urbana, en Cali los sistemas de recolección de agua lluvia reciclan la esorrentía, aumentando la sostenibilidad de los suministros de agua; también pueden reducir las descargas de esorrentía y, por lo tanto, ayudar a cumplir los objetivos de calidad del agua (Haque

et al., 2016), que para el caso de Colombia será determinado por el Decreto 1575 de 2007. Los sistemas reciben las escorrentías provenientes de la calle y estas podrán complementar el suministro de agua potable proveniente de la entidad prestadora del servicio de acueducto (EMCALI).

6.2.Diseñar un sistema rentable de almacenamiento de agua lluvia en viviendas existentes de la ciudad Santiago de Cali

En algunas ciudades del país se viven épocas de sequías, siendo necesario prever una situación de racionamiento, la cual es posible con el auto suministro de agua desde los techos de las viviendas a través de sistemas de recolección (Susca, 2019) reduciendo la demanda de agua en la cuenca al menos a la mitad durante la estación seca (de Macedo et al., 2019).

El racionamiento voluntario se alcanza a través una buena conciencia del consumo del agua, y se logra con el almacenamiento de agua lluvia, en primer lugar esta medida dependerá de la forma y tamaño del techo (Tobías Ramírez, 2019) segundo por la demanda de agua y de los patrones de precipitación, tercero por el volumen de los tanques (Zanni et al., 2019).

(Okoye et al., 2015) es otro autor que se enfoca en el dimensionamiento óptimo de tanques de almacenamiento en sistemas de recolección de agua de lluvia doméstica quien propone un modelo de optimización para determinar el tamaño ideal del tanque para la captación y almacenamiento de una sola unidad de vivienda. También un modelo de optimización integrado y basado en la programación lineal para determinar el tamaño del tanque de almacenamiento de agua lluvia utilizando datos específicos del sitio, como el perfil de lluvia, el área del techo, el consumo de agua por persona y la población. Construyendo el sistema de tal manera que se minimice el

valor presente neto de los costos totales de construcción del tanque y los costos de compra de agua potable.

El modelo se aplicó a un estudio de caso del norte de Chipre, que mostró a través del análisis de sensibilidad cómo algunos parámetros afectan tanto el beneficio financiero neto como el tamaño óptimo del tanque de agua de lluvia. El análisis de sensibilidad revela que el tamaño óptimo del tanque aumenta con el área del techo, pero disminuye con un aumento en la tasa de descuento y el costo unitario de construir el tanque. Por otro lado, el beneficio financiero neto asociado con la implementación de la recolección de agua de lluvia aumenta con un aumento en el área del techo y el consumo diario de agua per cápita, pero disminuye con un aumento en la tasa de descuento y el costo unitario de construir el tanque. Hasta un valor umbral, un aumento en el número de residentes conduce a un aumento en el tamaño óptimo del tanque y el beneficio financiero neto. También hemos encontrado que el nivel de consumo diario per cápita no tiene efecto sobre el tamaño óptimo del tanque, mientras que la distribución mensual de la lluvia afecta significativamente tanto el tamaño óptimo del tanque como el beneficio financiero neto.

6.3. Suministrar constantemente agua de lluvia potable en una vivienda existente de

Santiago de Cali

El propósito de suministrar agua lluvia, es proporcionar insumos para un modelo de suministro de agua alternativo al que brinda la compañía de servicio público con un sistema de recolección, almacenamiento y purificación de agua lluvia para reutilizar el recurso pluvial (Hargreaves et al., 2019), el cual ofrece una triple solución, primero se evitan inundaciones, segundo se ahorra agua, tercero es para el consumo humano y por otro lado proporciona un aumento en las reservas de este líquido vital (Ulacia Balmaseda, 2014).

Para lograr dicho objetivo se debe considerar la reutilización del agua no potable, la cual requiere un tratamiento adicional, en algunos casos con la integración de procesos biológicos para el tratamiento del agua lluvia como una alternativa viable para mejorar la calidad del agua potable (Kabore et al., 2013). Si se quiere utilizar el agua de lluvia para consumo humano se recomienda que pase por un proceso de potabilización, ya sea: ósmosis inversa, cloración, rayos ultravioletas (UV), purificación por ozono, entre otros (Ulacia Balmaseda, 2014). En principio este genera un coste adicional al sistema de recolección de agua lluvia tradicional, sin embargo, al relacionarlo con el costo-beneficio de tener agua potable constantemente, garantiza beneficios adicionales como la reducción del gasto general a las facturas, efectividad ambiental y la viabilidad económica dentro de proyectos de vivienda (Jing et al., 2017), (Şahin & Manioğlu, 2019), (Farreny et al., 2011).

Otro método de purificación del agua lluvia es la ultrafiltración (UF) (Shi et al., 2014) los autores afirman que es una de las mejores opciones tanto para la purificación de las aguas lluvias como para las aguas residuales. Esta revisión resume los hechos conocidos sobre los procesos de ensuciamiento y los procedimientos de limpieza y los detalles de las combinaciones de limpieza física y química más exitosas. La limpieza óptima está estrechamente relacionada con la naturaleza del ensuciamiento. El conocimiento preciso tanto del tipo de ensuciamiento (orgánico, inorgánico o biológico) como del mecanismo de ensuciamiento (formación de gel, adsorción, deposición, bloqueo de poros o formación de torta) es la clave del éxito en la limpieza de la membrana UF porque esto permite una revisión exhaustiva de la incrustación y limpieza de membranas en aplicaciones de UF. En primer lugar, el ensuciamiento de la membrana, el motivo de la limpieza se aborda en términos de su causa, formas y los principales tipos de contaminantes y parámetros

efectivos. En segundo lugar, los objetivos, métodos, mecanismos y procesos de limpieza de membranas se discuten en gran detalle:

- La limpieza de membrana es un paso vital para mantener la permeabilidad y selectividad de la membrana. También es necesario devolver la planta a su capacidad original, minimizar la contaminación bacteriológica y producir productos aceptables.

- Existen tantos tipos de regímenes de limpieza como tipos y mecanismos de ensuciamiento. En general, los medios comercialmente populares, denominados limpieza convencional, incluyen grupos de métodos físicos y químicos. También se discuten los métodos no convencionales, incluida la limpieza ultrasónica y eléctrica.

- Un proceso de limpieza puede incluir varios pasos, dependiendo de la situación de ensuciamiento. Los protocolos de limpieza comunes adoptados por diversas industrias consisten en un lavado hidráulico antes y después de la limpieza química/biológica. Sin embargo, para permitir la optimización, el flujo de limpieza detallado debe estar especialmente diseñado para un trabajo en particular.

- Los parámetros del proceso de limpieza incluyen la elección de agentes de limpieza adecuados y su concentración, orden y duración de los pasos de limpieza, hidrodinámica, pH y temperatura.

Finalmente, se discute la desintegración de la membrana causada por el proceso de limpieza. La desintegración se revela como cambios estructurales de la membrana, fragilidad de las fibras de la membrana y un rendimiento de filtración comprometido. El mecanismo más estudiado es la escisión de la cadena polimérica que ocurre en los materiales de membrana, debido a los ataques de los oxidantes en la solución de limpieza.

El estudio realizado por (Senevirathna et al., 2019) en Australia indica que la demanda de agua presenta un crecimiento exponencial junto con la disminución del agua dulce utilizable debido a diversos eventos climáticos, ambientales y antropogénicos. Los procesos sostenibles automatizados para tratar el agua lluvia hacen que la recolección de agua de lluvia sea una práctica útil. De acuerdo con las regulaciones sanitarias australianas, beber agua de lluvia es de bajo riesgo, siempre y cuando la captación del techo, el sistema de recolección y el almacenamiento tengan mantenimiento constante. En el caso de estudio del edificio CSU Engineering, el agua de lluvia que recoge de la cuenca del techo se almacena fuera del edificio y se trata bajo demanda en una planta de tratamiento de agua totalmente transparente instalada en la entrada del edificio. El proceso de tratamiento consiste en varias operaciones, que incluyen aireación, filtración de arena, adsorción de GAC y desinfección UV. Dentro de una planta de tratamiento, a la cual se evalúa durante 30 meses. Dentro de los resultados del estudio, los parámetros de calidad del agua tratada estaban dentro de los estándares de calidad del agua potable de Australia incluso mejoró los estándares del agua municipal disponible. La unidad de aireación mejoró los estándares secundarios de calidad del agua (olor y sabor) y el proceso de adsorción fue efectivo para la eliminación de metales.

Teniendo en cuenta que en la Organización Mundial de la Salud (OMS) sostiene unas características mínimas para el consumo de agua potable a nivel mundial, Colombia estandarizó la calidad del agua con la Resolución 2115 de 2007, con esto se puede afirmar que Australia y Colombia tienen estándares similares.

7. Marco metodológico

Figura 9. Marco metodológico

PRIMERA PARTE						METODOLOGÍA			SEGUNDA PARTE = DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA O TÁCTICAS			OBJETIVO GENERAL
PROBLEMA	CAUSAS	EFFECTOS	FINES	MEDIOS	ESTRATEGIAS	TÁCTICAS	ANÁLISIS	DEFINICIÓN	RESULTADOS			
Insuficiencia en los mecanismos de recolección de agua lluvia y consumo excesivo de agua potable en viviendas	Consumo excesivo de agua potable desde fuentes municipales	Aumento en el consumo y tarifas del servicio por costo de agua potable	Aprovechar la captación de agua lluvia para disminuir el impacto del consumo de agua potable desde las fuentes públicas en viviendas	Captación de agua lluvia	Teniendo en cuenta Normativa colombiana, cosechar el agua lluvia desde los techos de viviendas considerando la cantidad de lluvia en la zona	Tener en cuenta el clima de Cali. Analizar y definir el mejor techo. Definir el área de captación y 3 escenarios de abastecimiento para calcular la oferta de agua en un caso de estudio	Exploración para la captación de agua lluvia, considerando la oferta, analizando los tipos de cubiertas sus costos e identificando las mejores opciones vs prestaciones	Elegir la mejor opción de cubierta según sus características y costos en la implementación del caso de estudio, aplica para los 3 escenarios	Propuesta técnica y económica óptima para captar agua lluvia y reducir la captación de agua potable de fuentes públicas. Conclusión			
	Cambios climáticos deriva la ausencia de suministro de agua para el consumo diario en el hogar	Racionamiento de agua en épocas de sequía	Diseñar un sistema rentable de almacenamiento de agua lluvia en viviendas existentes	Almacenamiento de agua lluvia	Usar tanques de reserva para almacenamiento de agua lluvia acordes a oferta y demanda del agua lluvia	Definir la demanda del agua por persona. Calcular el tamaño óptimo del tanque según los 3 escenarios en un caso de estudio.	Evaluar tipos de almacenamiento de agua lluvia considerando la demanda, sus costos e identificando las mejores opciones vs prestaciones	Definir el tipo de tanque según sus características y costos. Calcular el tamaño del tanque para cada escenario del caso de estudio	Propuesta técnica y económica óptima para almacenar agua lluvia y suministrar agua a viviendas. Conclusión			
	Carencia de sistemas de recolección y purificación de agua lluvia en viviendas	Desaprovechamiento y contaminación del recurso lluvia	Suministrar constantemente agua de lluvia potable en una vivienda existente	Purificar agua lluvia	Teniendo en cuenta Normativa colombiana, purificar agua de un sistema de potabilización	Definir los sistemas de potabilización y distribución de agua lluvia e identificar la rentabilidad para los 3 escenarios propuestos en un caso de estudio	Investigar el tratamiento y purificación para el agua lluvia analizando sistemas de purificación simples y compuestos, sus costos identificando las mejores opciones vs prestaciones	Definir el sistema de potabilización acorde a oferta y demanda de agua lluvia en un caso de estudio	Propuesta técnica y económica óptima para potabilizar agua lluvia y reducir la contaminación de escorrentías. Conclusión			
Optimizar la recolección y purificación de agua lluvia en viviendas para consumo diario de agua potable y evaluar su rentabilidad en Santiago de Cali												

Nota: elaboración propia, (2023).

Teniendo en cuenta la carencia en los mecanismos de recolección de agua lluvia y optimización de consumo diario de agua potable en una vivienda colombiana, se determinan tres ejes transversales para desarrollar dicha problemática que son los objetivos específicos para lograr optimizar la recolección y purificación de agua lluvia en las viviendas para consumo diario de agua potable y evaluar la rentabilidad. Cada eje lleva un proceso en el que se determinan y gestionan de manera vertical unas estrategias y tácticas para lograr un fin dentro de cada eje, continuando con el eje transversal, viene el análisis y la determinación de materiales y elementos que componen el sistema de recolección, se obtienen resultados por cada eje vertical que finalmente se verán reflejados en un diseño de un sistema de recolección y purificación óptimo dentro de una vivienda unifamiliar. Para alcanzar este gran objetivo, se elige a Santiago de Cali como área de estudio, estableciendo una vivienda unifamiliar con una superficie de captación de 160 m² dentro del estrato socioeconómico 4, el DANE determina la densidad urbana de Cali con 3 habitantes por vivienda en promedio (DANE, 2018).

Comienza un análisis climático, una exploración de materiales que componen el sistema de recolección de agua lluvia y los costos que estos traen, para elegir los elementos adecuados según costo-beneficio que justifican la aplicación de los conceptos técnicos y económicos.

En línea con lo anterior, el ejercicio se realizará en una casa unifamiliar de un piso con 3 integrantes y una superficie de captación de 160 m² ubicada en el norte de la ciudad en el estrato 4, teniendo en cuenta cada eje del proceso, primero se analizan costos y materiales de los tipos de cubiertas, tipos de tanques y purificadores, haciendo referencia a cada objetivo específico del proyecto, luego se definen y eligen los materiales óptimos para el diseño de la cubierta, los tanques y purificadores, el cual permite comparar la capacidad económica de adquirir equipos de línea de tratamiento y purificación de agua lluvia, además por cambios en los porcentajes de subsidios o

aportes solidarios, pueden generarse variaciones en las tarifas de los usuarios de los estratos 1, 2 y 3 (sujetos de subsidios) o de estratos 5 y 6 (sujetos de aportes solidarios) mientras que el estrato 4 no aporta la contribución ni tiene subsidio, conveniente para sumar la contribución en caso de aplicar los ejercicios en estratos más altos o restar el subsidio en estratos más bajos.

Figura 10. Localización vivienda un piso barrio Vipasa – Santiago de Cali



Nota: elaboración propia, (2023).

7.1. Definición de escenarios

Con base en la definición del estudio de caso, se han definido tres (3) escenarios de consumo de agua lluvia (tabla 2). Como lo menciona Farreny “Todos ellos suponen que se recogería la esorrentía de aguas pluviales de los techos, ya que los techos son el tipo más común de captación utilizada para la recolección de lluvia. Esta esorrentía se acumularía en tanques de agua de lluvia para su consumo”, destinados para usos potables y no potables. Este sistema debe

estar conectado al tanque de reserva principal para garantizar el suministro continuo de agua. Se descarta el uso de la escorrentía de agua pluvial de la calle porque requiere de tratamientos de limpieza y purificación adicionales (Göbel et al., 2007).

Tabla 2. Escenarios propuestos

Escenarios	
100% consumo	1
51,4% consumo	2
18,6% consumo	3

Nota: elaboración propia (2023)

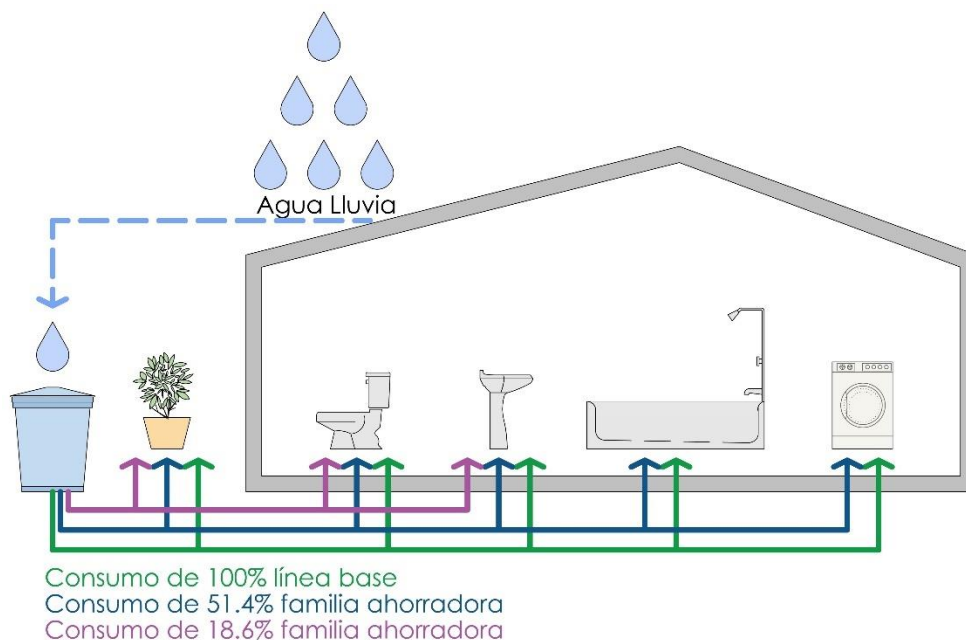
El primer escenario es la línea base teniendo en cuenta las definiciones del Ministerio de Vivienda de Colombia (2015) en la vivienda caso de estudio, consumen aproximadamente 0.63 m³ diarios de agua, este escenario abastece el 100 % con agua lluvia sin usar el agua potable proveniente de la compañía prestadora del servicio de acueducto (EMCALI).

El segundo escenario consume 0.32 m³ diarios de agua correspondientes al 51.4 % respecto de la línea base, este escenario abastece el 100 % de las necesidades de la vivienda con agua lluvia sin usar el agua potable proveniente de la compañía prestadora del servicio de acueducto (EMCALI), debido a que bajan el consumo diario y ahorran el 48.6 % del agua al mes.

El tercer escenario consume 0.12 m³ diarios de agua correspondientes al 18.6 % respecto al escenario anterior, este escenario abastece el 18.6 % de las necesidades de la vivienda con agua lluvia y el 81.4 % restante lo complementa con el agua potable proveniente de la compañía prestadora del servicio de acueducto (EMCALI).

En cualquiera de los escenarios el agua almacenada en los tanques de agua lluvia pasa por el sistema de potabilización y se distribuye de manera directa a los puntos hidráulicos: lavadora, cocina, inodoros, lavamanos, duchas y riego.

Figura 11. Esquema distribución de agua lluvia para los escenarios según el consumo



Nota: Elaboración propia (2023).

7.2. Modelo económico

El modelo pretende analizar el Costo de Ciclo de Vida (CCV) estimado de los materiales, los elementos del sistema de recolección, de almacenamiento, de distribución y potabilización de agua lluvia, costos de mantenimiento y determinar la viabilidad económica de algunos sistemas en diversos escenarios. El análisis del ciclo de vida es una técnica de análisis económico para estimar el costo total de un sistema durante su vida útil.

Como explica Farreny apoyado en otros autores, dentro del enfoque CCV, se realiza el cálculo del Valor Presente Neto (VPN) y el período de recuperación. El método de análisis de VPN es una de las herramientas más utilizadas para determinar el valor actual de futuras inversiones para comparar alternativas de sistemas de agua. El VPN proporciona una sólida base para la gestión de activos, ya que considera los costos y el rendimiento durante períodos prolongados de tiempo. En este análisis, los costos asociados de los sistemas recolección agua lluvia, como los gastos de capital, operativos y de mantenimiento, se equilibran con cualquier beneficio. Teniendo en cuenta la vida útil de las infraestructuras propuestas es de 20 a 60 años, el horizonte de tiempo del proyecto fue planteado a 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos.

El período de recuperación, que es el tiempo que se espera que tome un proyecto para obtener ingresos netos iguales al costo de capital del proyecto, se mide como la relación entre los costos totales de capital y la diferencia entre los ingresos y los gastos anuales. (Farreny et al., 2011) en otras palabras se define como la rentabilidad del sistema de recolección de agua lluvia.

Con el fin de demostrar la factibilidad del proyecto o rentabilidad en términos financieros, la inversión será justificada en la Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Presente Neto (VPN). Considerando así tres (3) escenarios, para cada uno de estos se realizará análisis de viabilidad comparando la TIR con la TIO (Tasa Interna de Oportunidad) que para proyectos medio ambientales es del 12 % (Raúl Castro et al., 2020) e identificando un VPN mayor a cero (0).

El estudio se realizó en 2023 con tarifas vigentes del año, incluyendo costos y gastos operacionales entre los que está la mano de obra, cotizados en el 2023. Para el estudio financiero se consideró un IPC anual (Índices Precios al Consumidor) del 3 % anual sobre los costos y gastos.

7.3. Metodología de dimensionamiento para tanques

La definición del tanque se determina por una serie de fórmulas tomadas de la Metodología de la Organización Panamericana de la Salud (Moreno Lozano, 2020), en esta metodología se tuvieron en cuenta los datos aportados por el DANE sobre las precipitaciones en Colombia desde 1981 hasta 2010 años con 2800 estaciones ubicadas a través de todo el país, datos que servirán para establecer la capacidad del tanque. Para el caso específico de Cali, se tomó en cuenta la estación de la Universidad del Valle. Dichas fórmulas serán aplicadas en cada escenario según la escala de abastecimiento.

En primer lugar, se debe determinar la demanda del agua, tomando la necesidad de agua por persona (consumo) se calcula la cantidad de agua a suministrar: La primera fórmula es la Demanda mensual en m³ (D_i) igual al número de personas (N_u) por número de días del mes (N_d) por la dotación (Dot) litros/persona x día, lo anterior sobre 1000

$$D_i = \frac{N_u \times N_d \times Dot}{1000}$$

En seguida se identifica el volumen del tanque de abastecimiento obtenida por la precipitación mensual, calculada así: la oferta del agua en el mes i (m³) es igual a la precipitación

mensual en lt/m^2 (P_{pi}) por el coeficiente de escorrentía (C_e) por el área de captación (A_c) sobre 1000

$$A_i = \frac{P_{pi} \times C_e \times A_c}{1000}$$

Una vez realizado esto, hay que calcular el agua acumulada de cada mes para la oferta y para la demanda, también se calcula la diferencia de los valores acumulados de oferta y demanda mes a mes, en caso de obtener resultados negativos, quiere decir que el área del techo es muy pequeña y no capta suficiente agua lluvia para suplir la demanda. Para estos casos el acumulado de oferta y demanda se pueden determinar así: La oferta acumulada en el mes i (Aa_i) es igual a la oferta acumulada en el mes $i-1$ (Aa_{i-1}) más la división de la precipitación mensual (P_{pi}) por el coeficiente de escorrentía (C_e) por el área de captación (A_c) sobre 1000 y para la demanda: demanda acumulada en el mes i (Da_i) igual a demanda acumulada en el mes $i-1$ (Da_{i-1}) más la división entre el número de personas (N_u) por número de días del mes (N_d) por la dotación (Dot) sobre 1000

$$Aa_i = Aa_{i-1} + \frac{P_{pi} \times C_e \times A_c}{1000}$$

$$Da_i = Da_{i-1} + \frac{N_u \times N_d \times Dd_i}{1000}$$

Y el volumen de almacenamiento requerido en el mes i (V_i) igual al volumen captado en el mes i (A_i) menos el volumen demandado en el mes i (D_i)

$$V_i = A_i - D_i$$

Al finalizar la aplicación de estas fórmulas, tendremos el valor óptimo para el tanque de recolección de agua lluvia, es necesario tener en cuenta que, en el sistema de recolección propuesto, se requiere de un elemento purificador, por lo tanto, son necesarios dos tanques, el de recolección del agua lluvia o agua cruda, y el segundo tanque ubicado después del sistema de purificación para el agua tratada.

8. Análisis técnico y económico

El siguiente título pretende tener en cuenta las variables técnicas de cada parte del sistema de recolección de agua lluvia incluido lo referente a limpieza y purificación con sus respectivos costos para identificar los pros y contras de cada parte.

8.1. Exploración para la captación de agua lluvia

Para determinar la disponibilidad de agua lluvia en categorías, (Şahin & Manioğlu, 2019) formula que los países con disponibilidad de agua inferior a 1000 mm por persona se clasifican como "pobres en agua", los países con disponibilidad de agua entre 1,001–3,000 mm por persona se clasifican como "escasos de agua". Los países con disponibilidad de agua entre 3.001 y 10.000 mm se clasifican como "ricos en agua", por lo tanto, aplicando estas categorías en Colombia se evidencia con la información recolectada del IDEAM, que la cantidad de lluvias anuales en el país varían según las ciudades y regiones así:

Tabla 3. Milímetros de agua anuales en los 32 municipios de Colombia

MUNICIPIOS		mm	MUNICIPIOS		mm
1	Arauca	1867,72	17	Mocoa	3743,70
2	Armenia	2182,36	18	Montería	1306,17
3	Barranquilla	750,15	19	Neiva	1379,75
4	Bogotá	841,18	20	Pasto	1094,67
5	Bucaramanga	1276,19	21	Pereira	2424,44
6	Cali	1483,40	22	Popayan	2110,78
7	Cartagena	922,83	23	Puerto Carreño	2328,81
8	Cúcuta	904,18	24	Quibdó	8051,04
9	Florencia	3647,33	25	Riohacha	634,06
10	Guaviare	2725,57	26	San Andrés	1887,09
11	Ibagué	1691,44	27	Santa Marta	1620,54
12	Inírida	3327,92	28	Sincelejo	1288,13
13	Leticia	3389,07	29	Tunja	652,48
14	Manizales	1583,70	30	Vallidupar	1025,38
15	Medellín	1752,28	31	Villavicencio	4537,83
16	Mitú	3455,75	32	Yopal	2390,11

Nota: elaboración propia con información del IDEAM (2018).

Se reorganiza y categorizan los municipios según la cantidad de agua en los 3 rangos mencionados y Cali se encuentra entre las ciudades “escasos de agua” con 1483,40 mm IDEAM (2018),

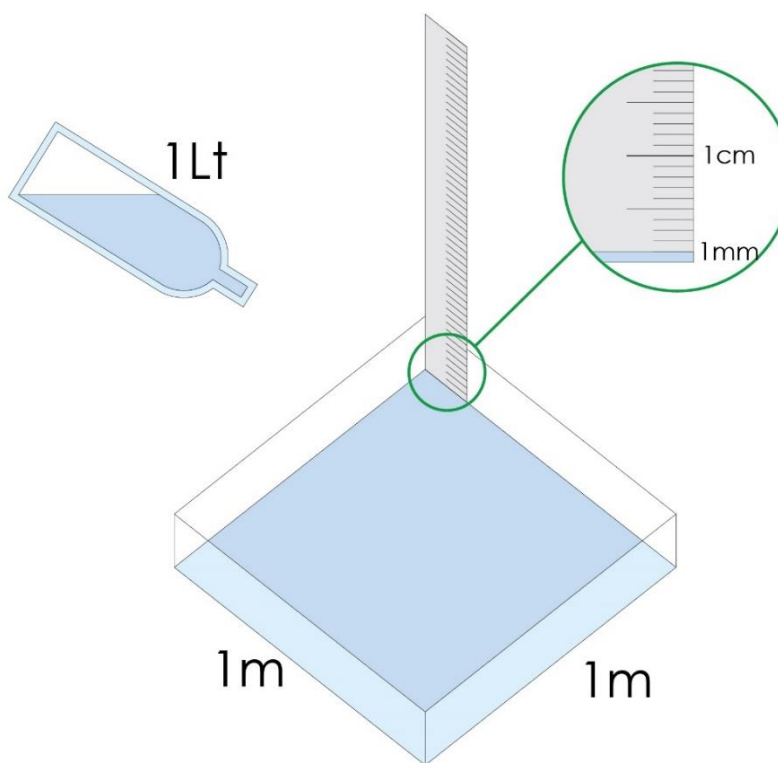
Tabla 4. Rangos de los Milímetros de agua anuales

MUNICIPIOS	mm	R
Riohacha	634,06	
Tunja	652,48	
Barranquilla	750,15	
Bogotá	841,18	
Cúcuta	904,18	
Cartagena	922,83	
Valledupar	1025,38	
Pasto	1094,67	
Bucaramanga	1276,19	
Sincelejo	1288,13	
Montería	1306,17	
Neiva	1379,75	
Cali	1483,40	
Manizales	1583,70	
Santa Marta	1620,54	
Ibagué	1691,44	
Medellín	1752,28	
Arauca	1867,72	
San Andrés	1887,09	
Popayan	2110,78	
Armenia	2182,36	
Puerto Carreño	2328,81	
Yopal	2390,11	
Pereira	2424,44	
Guaviare	2725,57	
Inírida	3327,92	
Leticia	3389,07	
Mitú	3455,75	
Florencia	3647,33	
Mocoa	3743,70	
Villavicencio	4537,83	
Quibdó	8051,04	

Nota: En los 32 municipios de Colombia, elaboración propia con información del IDEAM (2018).

La precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie (m^2), es decir, la altura de la lámina de agua recogida en una superficie plana es medida en mm o l/m^2 (1 milímetro de agua de lluvia equivale a 1 l de agua por m^2). En el caso del agua, existe una correspondencia entre 1 mm y 1 l/m^2 , porque un litro en un cubo de un metro de ancho y un metro de largo ocupa en volumen exactamente un milímetro de altura. sólo hay que pensar en que, como es habitual conocer, un cubo de 1 metro cúbico (un metro de alto, uno de ancho y uno de alto) tiene una capacidad de 1000 litros. sí un metro de altura son 1000 milímetros (mm), entonces 1 milímetro de agua de lluvia corresponderá, por tanto, a 1 l de agua por m^2 (1 l/m^2)

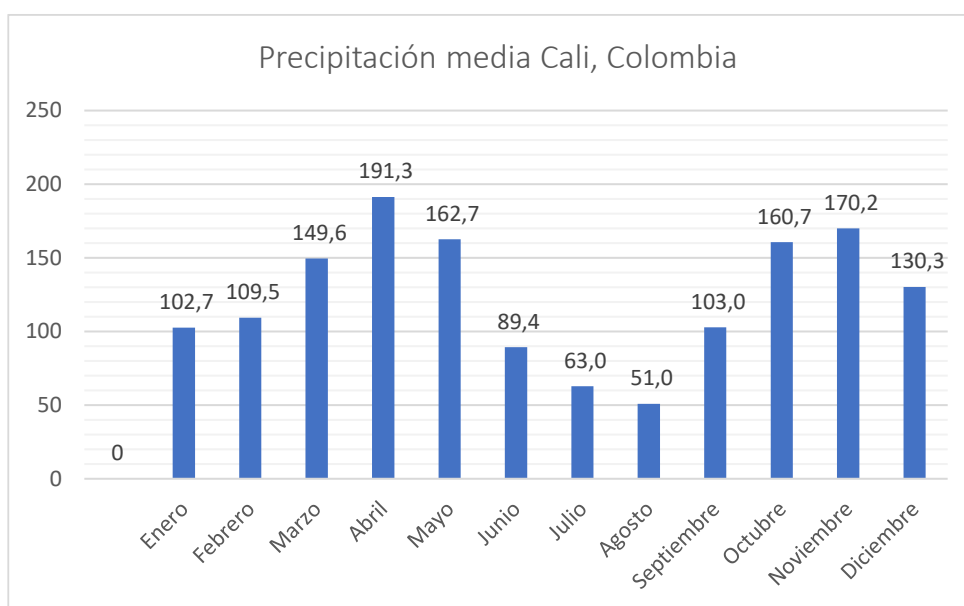
Figura 12. Cálculo del volumen de agua lluvia



Nota: Elaboración propia (2023).

Cali cuenta con un clima cálido seco con una precipitación media anual de 1483.40 mm con mayores lluvias en abril (191.3 mm) y noviembre (170.2 mm) y la menor cantidad de lluvia en agosto (51.0 mm) al mismo tiempo con una alta demanda de agua lo que resulta en escasez del agua (Planeación Municipal et al., 2020). a continuación, se indica la precipitación mensual de Cali.

Figura 13. Precipitación media mensual en Cali, Colombia



Nota: Elaboración propia (2022).

Tabla 5. Precipitación media mensual en Cali, Colombia

Precipitación media Cali, Colombia	
	mm o l/m ²
	mensual
Enero	102,7
Febrero	109,5
Marzo	149,6
Abril	191,3 Más lluvioso
Mayo	162,7
Junio	89,4
Julio	63,0
Agosto	51,0 Mas seco
Septiembre	103,0
Octubre	160,7
Noviembre	170,2
Diciembre	130,3
TOTAL	1.483,4 lt
PROMEDIO	123,6

Nota: Elaboración propia (2022).

La recolección de aguas lluvias comienza desde la captación del recurso hídrico en los techos de las viviendas, variando materiales como tejas de concreto, tejas de cerámica, chapa de acero galvanizado, terraza en concreto; en su formas y tamaños, aquí el inicio de un buen sistema o el fracaso de este.

El tipo de material del que está hecho el techo determina la calidad bacteriológica del agua. La porosidad del techo afecta la retención de impurezas de polvo que transportan tanto promotores como inhibidores del desarrollo microbiano (Zdeb et al., 2020)

Figura 14. Esquema de sistema de recolección de agua lluvia - Cubierta



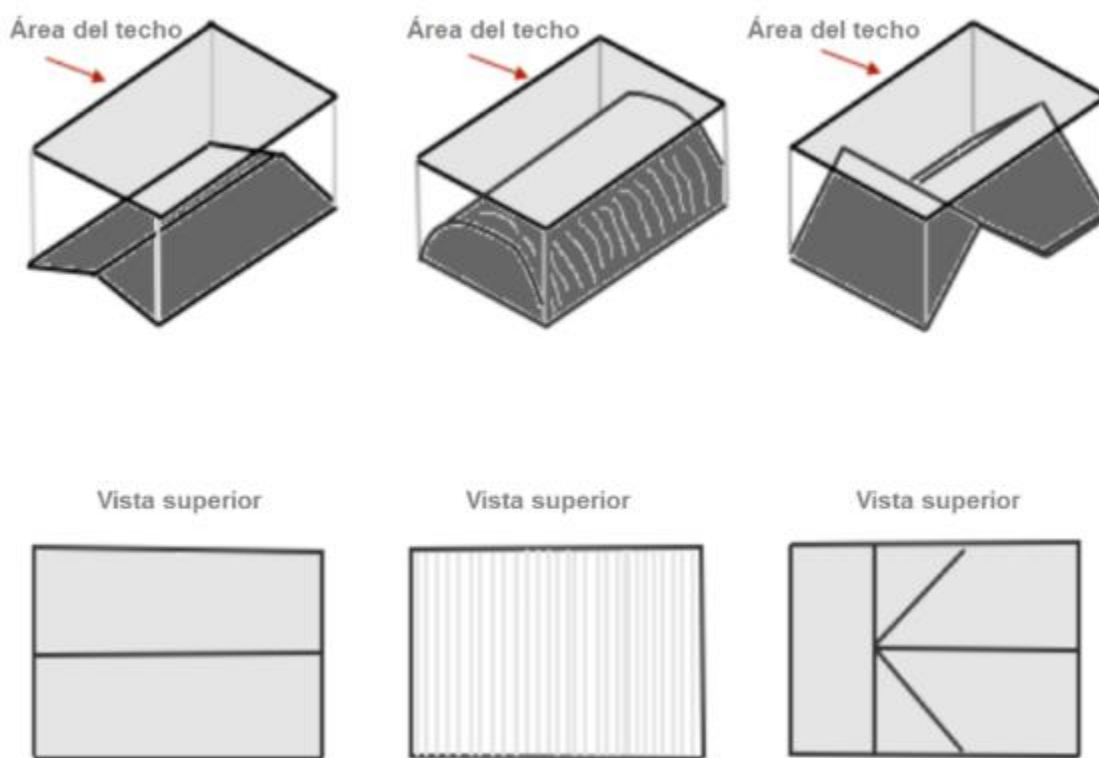
Nota: elaboración propia (2022)

Análisis técnico de cubiertas

Para lograr reducir el consumo de agua potable de las empresas municipales (EMCALI) se requiere del manejo de cubiertas determinadas por los materiales de fabricación (Lade et al., 2013). Dichos materiales son adecuados para la captación de agua de lluvia para fines no potables. Sin embargo, para que la recolección sea adecuada para fines potables, recomiendan que algunas cubiertas deben recubrirse con pintura de aluminio epóxica y el agua cosechada debe someterse a algún tratamiento. Asimismo, la superficie de captación (figura 15) es importante para determinar valores que serán de importancia para saber la cantidad de agua que se va a recolectar (Lade et al., 2013). Por otra parte, la cantidad de agua de lluvia recolectada puede variar según las áreas de superficie como techos, terrazas y patios de donde se recolecta el agua de lluvia, la forma del

edificio y según las cifras de precipitación anual en cada región climática (Şahin & Manioğlu, 2019)

Figura 15. Captación - Área de techo



Nota: Claudia Lasprilla Pina (<https://www.ruvival.de/es/calculadora-recoleccion-de-agua-de-lluvia/>)

Berköz, (1995) profundiza en el tema de la forma del edificio y todas las variables geométricas de estos, incluido el factor de forma o como él lo determina: “la relación entre la longitud del edificio y la profundidad del edificio en el plano”, igualmente la altura, el tipo de techo, la pendiente del techo, la pendiente de la fachada las cuales afectan el diseño sensible al

clima para obtener beneficios óptimos de los elementos climáticos y finalmente el factor de escorrentía de techos tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes de escorrentía

coeficiente de escorrentía	
Tipo de techo	Coeficiente
lámina de hierro	>0,9
lámina de aluminio	0,8-0,9
tejas	0,6-0,9
techos de cementos planos	0,6-0,7
orgánicos	<0,3

Nota: elaboración propia basado en Universidad de Hamburgo (2023).

Características de Tejas Asfálticas:

Además del aspecto decorativo, las tejas sirven para proteger los techos del clima y son aislantes térmicos y acústicos, impermeables, ignífugas y mantienen la ventilación del techo. Además de la variedad de materiales, estilos y colores, cada tipo de tejas presenta diferentes formas que también cumplen una función, principalmente canalizar el agua, las hojas y en algunos casos el granizo o nieve.

Figura 16. Teja asfáltica



Nota: Cubiertas asfálticas, tomado de Pinterest

Ventajas del uso de tejas asfálticas

1. Debido a su resistencia no requieren mantenimiento constante. Esto va a depender mucho de la calidad de la teja asfáltica que se elija. Su resistencia no solo aplica para lluvias, sino también para granizo, nieve e incluso fuego.

2. Existen diferentes modelos de tejas de donde elegir. No solo existen diferentes tipos de tejas asfálticas, también hay diversidad de modelos. Las tejas asfálticas más costosas suelen imitar materiales como madera. En cuanto a colores, su variedad permite que siempre se encuentre una teja asfáltica ideal, según el diseño de cada propiedad, así la estética no se pierde.

3. Las tejas asfálticas son de un material liviano si se les compara con otros similares. Eso sí, siempre se debe tener cuidado con la marca que se elige, existen tejas más livianas que otras, así que hay que tener precaución con las que contienen menos asfalto.

A los puntos anteriores no podemos dejar de agregar la velocidad de instalación de las tejas asfálticas porque se pueden llegar a instalar 70 metros cuadrados en una jornada de trabajo de 8 horas.

Desventajas de las tejas asfálticas

1. Requieren mantenimiento 1 vez al año. Esto es necesario para poder conservar el buen estado de la teja instalada. Por lo general el mantenimiento tiene que ser dado por profesionales. Pese a que resulta un gasto (aparte de la instalación) este es más rentable que el reemplazo de las tejas y permite que su tiempo de vida se alargue considerablemente. Parte del mantenimiento es la limpieza del techo y la eliminación de residuos acumulados.

2. El costo es ligeramente más alto que las tejas de arcilla, ya que el costo directo suele exceder en un 10 % al de las tejas convencionales. Pese a ello, si se tiene en cuenta las desventajas de las tejas de arcilla, que acortan su tiempo de uso, la adquisición de tejas asfálticas resulta más rentable, incluso si se tiene en cuenta el mantenimiento que tiene que dársele.

3. No todas las marcas de tejas asfálticas son iguales. Aunque las tejas asfálticas son una buena opción, no se puede comprar este producto a cualquier proveedor. Es necesario investigar cuáles son las favoritas y no escatimar en gastos para conseguir las de mejor calidad, eso permitirá que la inversión sea rentable.

Existen más ventajas que desventajas del uso de tejas asfálticas. Estas últimas incluso pueden omitirse si se elige a un buen proveedor y una buena marca. Un beneficio adicional de las tejas es que existen diversidad de modelos, por lo que, sin lugar a duda, alguno se adaptará a la estética de la propiedad en la que serán instaladas. (Mavegsa, 2019)

Costos de la teja asfáltica en la ciudad de Cali con una pendiente media del 47

%, compuesta de: formación de pendientes: tablero cerámico hueco machihembrado, para revestir, 100x30x3,5 cm, con las testas rectas sobre muros divisorios interiores aligerados de 100 cm de altura media; cobertura: teja asfáltica rectangular, sobre capa de imprimación de emulsión asfáltica aniónica con cargas. Costo directo \$ 88.832 m²

Características de las tejas de fibrocemento vs las tejas termoacústicas

1. Menos peso = menos estructura = menos costo. Es un mito creer que para cubiertas livianas la estructura portante es más económica porque puede ser igualmente liviana. En opinión de los ingenieros calculistas y constructores de estructuras, mientras más pesada sea una cubierta mejor soporta el fenómeno de «succión», o presión hacia arriba, originado por la presencia de vientos fuertes. Por su bajo peso, una cubierta Termoacústica no ayudara a contrarrestar el efecto de succión si no cuenta con más soporte estructural.

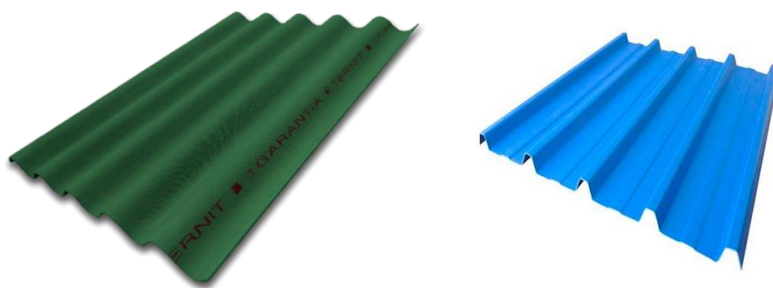
2. En algunos casos las mismas cubiertas producen ruidos. Por ejemplo, las cubiertas Termoacústica metálicas, ante el aumento de la temperatura a lo largo del día y por su alto coeficiente de dilatación, producen ruidos, que suenan como golpes, debidos a las expansiones que se manifiestan repentinamente. También cuando el espesor de las tejas es muy delgado el ruido de la lluvia pasa al interior y perturba la tranquilidad de los habitantes. Las cubiertas de fibrocemento por tener un menor coeficiente de dilatación y mayor espesor presentan mejor amortiguación de estos ruidos, lo cual se traduce en mayor confort para el usuario final.

3. Son libres de asbesto o amianto, ampliamente utilizado en la construcción entre 1920 y 2002, año en que quedó prohibido su uso y comercialización en nuestro país por su potencial carcinógeno por inhalación.

4. En cuanto a las tejas Termoacústica metálicas, la presencia de una capa bituminosa en medio de dos capas metálicas (aluminio y acero) mejora sus condiciones térmicas. Sin embargo, si la capa superior de aluminio se fisura, lo cual es muy común, entonces el asfalto queda expuesto y la cubierta empezara a perder rápidamente sus propiedades. En el caso de las tejas Termoacústica plásticas, tanto el material como el color blanco ayudan a mejorar su desempeño térmico. Sin embargo, por no ser producido con material 100 % virgen, cuando la teja es sometida a temperaturas superior a 40 grados la cubierta tendera a deformarse y con el tiempo cristalizarse. Aunque las tejas de fibrocemento reflejan del 30 al 50 % de los rayos, lo demás se absorbe debajo de la cubierta, lo cual puede ser incómodo para el usuario final. Este problema se puede solucionar de diferentes formas tales como:

- Pintando la teja de color blanco, lo cual ayuda a incrementar el porcentaje de rayos que refleja la teja.
- Utilizando accesorios de ventilación tales como las tejas y los caballetes de ventilación.
- Instalando un cielo raso debajo de la cubierta, que se puede combinar con algún tipo de aislamiento térmico y ventilación para mayor desempeño.
- Instalando tejas de barro sobre la cubierta, una solución estética que además mejora el manejo de temperaturas. (Dubois, 2018)

Figura 17. teja fibrocemento, teja termoacústica



Nota: Izquierda teja fibrocemento, derecha teja termoacústica, tomado de Eternit y Ajoever.

Costos de la teja fibrocemento en la ciudad de Cali con cobertura de paneles formados por placa ondulada de fibrocemento sin amianto, color arcilla, en la cara exterior, núcleo aislante de espuma de poliuretano y acabado interior con lámina de poliéster reforzado con fibra de vidrio, color blanco; de 2500 mm de longitud, 1100 mm de anchura y 54 mm de espesor, para cubierta inclinada, con una pendiente mayor del 10 %, colocados con un solape del panel superior de 150 mm y fijados mecánicamente a cualquier tipo de correa estructural. Incluso accesorios de fijación de los paneles. El precio no incluye la superficie soporte ni los puntos singulares y las piezas especiales de la cobertura. Costo directo \$ 90.930 m²

Características de Tejas de cemento o losa en concreto

Son las más económicas y resistentes, se pueden construir en sitio junto con la edificación (losa en concreto). Además, vienen en una amplia variedad de colores y tienen una vida útil de hasta cincuenta años. (Holcim, 2020) El peso es muy alto, más que las tejas de barro, requiere de selladores o impermeabilizantes para evitar filtraciones y creación de hongos.

Figura 18. Teja de concreto



Nota: Teja en concreto, tomado de Pinterest.

Los precios de las tejas varían principalmente según el tipo y el área que se vaya a cubrir, además por temas de transporte o cambios en el mercado, por lo tanto, los precios aquí mencionados pueden variar. Se toman precios en el mercado actual de páginas web oficiales que venden los productos.

Costos de la losa de 10 cm de canto, con encofrado perdido de lámina de acero galvanizado con forma corrugada, de 0,75 mm de espesor, 58,80 mm de altura de perfil y 305 mm de intereje y concreto armado realizado con concreto $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ (21 MPa), clase de exposición F0 S0 P0 C0, tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, preparado en obra, y fundido con medios manuales, volumen total de concreto $0,062 \text{ m}^3/\text{m}^2$; acero Grado 60 ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$), con una cuantía total de 6 kg/m^2 ; y malla electrosoldada tipo XX50; apoyado todo ello sobre estructura metálica. Incluso piezas angulares para remates perimetrales y de voladizos, tornillos para fijación de las láminas, alambre de atar, separadores y agente filmógeno para el curado de concretos y morteros. El precio incluye el figurado del acero (corte y dobléz) en el área de trabajo, en obra y el armado en el lugar definitivo de su colocación en obra, pero no incluye la estructura metálica. Costo directo \$ 82.254 m^2

Tabla 7. Resumen del análisis de cubiertas

Resumen del análisis de cubiertas					
Sistema	Material	Ventajas	Desventajas	Mantenimiento	Costo inicial
Tejas asfálticas	Asfalto	durabilidad, livianas, aislante térmico y acústico, material ignífugo, impermeable, coeficiente de escorrentía alto, libre de asbesto o amianto	costo ligeramente más alto que los otros, mantenimiento por profesionales	1 vez al año	Aprox. \$ 88,000 el m ²
Teja fibrocemento	Fibrocemento	Aislante acústico, material ignífugo, impermeable	Frágiles, propenso al moho, desprendimiento de partículas y propensas a generar enfermedades	1 o 2 veces por año	Aprox. \$ 91,000 el m ²
Teja termoacústica	plástico + metal + asfalto	Aislante térmico, libre de asbesto o amianto, coeficiente de escorrentía alto	muy liviana y requiere de mayor estructura y amarres para soportar el fenómeno de succión, producen ruidos por el metal	2 o 3 veces por año	Aprox. \$ 95,000 el m ²
Teja cemento o losa en concreto	cemento	puede construir en sitio, durabilidad, coeficiente de escorrentía alto, libre de asbesto o amianto	filtraciones, requiere de impermeabilizantes	1 vez al año	Aprox. \$ 83,000 el m ²

Nota: elaboración propia (2024).

Bajantes de aguas pluviales

Finalmente, las bajantes de aguas blancas o bajantes de aguas pluviales por las cuales baja el agua y se deposita en los tanques de almacenamiento, hay variedad de materiales en los que los podemos encontrar como plomo, cobre, hierro o acero, metálicas mixtas, hormigón o cemento y las más comunes en la actualidad de plástico PVC (cloruro de polivinilo) o PE (polietileno). Por otra parte, se deben usar los interceptores de las primeras aguas que sirven para separar los sedimentos del techo que son arrastrados por los primeros minutos de lluvia los cuales pueden ser larvas de mosquitos, metales pesados, polvo, hojas, excrementos de animales y bacterias, dichos interceptores se ubican al principio y al final de las canales de estos bajantes: al inicio en la canaleta se instala una malla galvanizada o plástica (figura 20) para impedir que los materiales gruesos pasen, y al finalizar el bajantes se instala otro mecanismo de separación para evitar que materiales delgados contaminen el agua del tanque (Moreno Lozano, 2020)

Figura 19. Canaleta con rejilla



Nota: Canaleta con rejilla, tomado de Pinterest.

8.2. Evaluaciones para el almacenamiento de agua lluvia

La evaluación del consumo de agua se obtiene del consumo relacionados con los usos específicos del agua en la vivienda promedio en Colombia, es decir, de los litros o metros cúbicos que requiere cocinar los alimentos, ducharse por 5 o 15 minutos, usar la lavadora, regar las plantas entre otros que no solo depende de cada usuario, sino de factores culturales, socioeconómicos y hasta la altitud del territorio (Chávez Zambrano et al., 2020). En Colombia se promedia mensualmente el consumo básico de agua potable bajo la Resolución CRA 750 de 2016, por medio de la cual se modificó el rango de consumo básico en el territorio nacional, teniendo en cuenta la altitud promedio sobre el nivel del mar y según la ubicación geográfica (altitudes) (GOV.CO, 2022) como lo indica la siguiente tabla.

Tabla 8. Promedios de consumo básico de agua en Colombia

CLIMA	ALTITUD	RANGO DE CONSUMO BASICO (m ³ /suscriptor/mes)
Cálido	0 – 1000	19
Templado	1000 – 2000	18
Frío	>2000	17

Nota: Tomado del documento de proyecto general: Rango de Consumo Básico - Minvivienda (2015).

Tras la investigación en manuales de usuarios y paginas oficiales de marcas reconocidas y referencias seleccionadas de lavadoras se encontró que aquellas de carga superior consumen más agua que las de carga frontal, y que los inodoros el consumo de los aparatos de dos descargas (ahorradore) es mucho menor al tradicional.

Como línea base se define que para el consumo diario de una persona con un perfil tradicional en Colombia corresponde al primer escenario de la metodología de estudio, esta satisface sus necesidades diarias sin restringirse mayormente, pero tampoco siendo excesivo en su consumo, los usos o actividades que lleva son: Lava la ropa en una lavadora de carga superior con 16.6 litros. Consume (hidratación) 2.2 litros. Utiliza 2.0 litros diarios para cocinar, lavar alimentos y lavar los platos, los alimentos se lavan una vez al día durante cinco minutos con la llave abierta (25.5 L aprox.) y la loza durante 10 minutos con la llave abierta (25.5 L aprox.). Se lava los dientes tres veces al día durante tres minutos con la llave abierta (8.0 L aprox.), se lava la cara y manos durante un minuto con la llave abierta tres veces al día (21.0 L aprox.). Se ducha con una duración entre 5 a 10 minutos (8 Min promedio) y con caudal de 14 litros por minuto, el consumo ronda entre los 37.5 litros. Utiliza el inodoro cuatro veces al día, y se lava las manos un minuto después de cada uso (36.0 L). Hace aseo dos veces en semana usando 1 a 3 baldes para lavar pisos e inodoros principalmente (equivalente a 1.6 L aprox.). Para el riego depende de la tierra, el clima y

el área a regar, en promedio para un antejardín, patio interno y plantas florales se requieren de 0.2 litros. (Chávez Zambrano et al., 2020).

Tabla 9. Consumo persona línea base (L)

Consumo de agua en el hogar - línea base consumo del 100%			
	consumo Lt / persona		
	diario	mensual	anual
Lavadora (a)	16,6	499,4	6.075,6
Hidratación	2,2	66,0	803,0
Cocinar, lavar alimentos y platos	52,0	1.560,0	18.980,0
Inodoro (b)	36,0	1.080,0	13.140,0
Lavar dientes	8,0	240,0	2.920,0
Lavar manos	21,0	630,0	7.665,0
Ducha (c)	72,5	2.175,0	26.462,5
Aseo (a)	1,6	49,0	596,2
Riego (a)	0,2	7,0	85,2
Total	210,2	6.306,4	76.727,4

(a) Usos al mes= 3
 (b) descargas diarias= 4
 (c) ducha en minutos= 15

Nota: Elaboración propia (2022).

Para la aplicación de fórmulas será necesario tener el consumo en m³ así que se dividen los anteriores valores entre 1000 debido a la conversión de unidades de litros (L) a metros cúbicos (m³)

Tabla 10. Consumo persona línea base (m³)

Total	0,21	6,31	76,73
-------	------	------	-------

Nota: Elaboración propia (2022).

Por otro lado, el segundo escenario planteado, evidencia un ahorro frente a la línea base del 48.6 %, se tendrán en cuenta las características de una persona con un perfil ahorrador que satisface todas sus necesidades diarias de agua, pero tiene una conducta más restringida en cuanto

al consumo, los usos o actividades que lleva son: la lavadora cambia de una referencia de carga superior a una de carga frontal (5.6 L), mantiene la misma hidratación, utiliza 26.0 L para cocinar, lavar alimentos y lavar los platos, SIN mantener la llave abierta. Se lava los dientes tres veces al día, lava la cara y manos durante un minuto SIN la llave abierta (11.0 L). Se ducha con una duración máxima de 5 minutos (37.5 L). Cambiar el inodoro por uno ahorrador y usarlo cuatro veces al día, y se lava las manos un minuto después de cada uso (24.0 L). Mantiene el aseo dos veces en semana y el riego.

Tabla 11. Consumo persona ahorradora (L)

Consumo de agua en el hogar - familia ahorradora consumo del 51,4%			
	consumo Lt / persona		
	diario	mensual	anual
Lavadora (a)	5,6	166,9	2.031,1
Hidratación	2,2	66,0	803,0
Cocinar, lavar alimentos y platos	26,0	780,0	9.490,0
Inodoro (b)	24,0	720,0	8.760,0
Lavar dientes	4,0	120,0	1.460,0
Lavar manos	7,0	210,0	2.555,0
Ducha (c)	37,5	1.125,0	13.687,5
Aseo (a)	1,6	49,0	596,2
Riego (a)	0,2	7,0	85,2
Total	108,1	3.243,9	39.468,0

(a) Usos al mes= 3

(b) descargas diarias= 4

(c) ducha en minutos= 5

Nota: Elaboración propia (2020).

el equivalente de consumo en m³ es de:

Tabla 12. Consumo persona ahorradora (m³)

Total	0,108	3,244	39,468
-------	-------	-------	--------

Nota: Elaboración propia (2020).

El tercer escenario, cuenta las características de una persona con un perfil ahorrador, pero que en este caso solo se usa el 18.6 % del agua respecto a la tabla del consumo persona ahorradora (tabla 10), únicamente se tiene en cuenta la hidratación (2.2 L diarios) uso del inodoro ahorrador cuatro veces al día con lavado manos después de cada uso (24.0 L). Lavarse los dientes y las manos (11 L diarios) Mantiene el aseo dos veces en semana y el riego (1.8 L). Las otras actividades requieren de ser solventadas con la empresa prestadora del servicio de agua potable. El criterio para no suplir todas las actividades y electrodomésticos, es que se identificaron aquellos que requieren de un mayor caudal de agua para funcionar bien y requieren agua potable, manteniendo la premisa de potabilizar el agua para el consumo. La elección en el primer y segundo escenario es tener un KIT de Planta de Tratamiento de Agua Lluvia Completo mientras que en el tercer escenario se decide cambiar el sistema de potabilización prefabricado de filtros grandes y mayor caudal, por uno sencillo para cocina ahorrando un costo inicial en la inversión total.

Tabla 13. Consumo agua de una persona (L)

Consumo de agua en el hogar - familia ahorradora consumo del 18,6%			
	consumo Lt / persona		
	diario	mensual	anual
Lavadora (a)	-	-	-
Hidratación	2,2	66,0	803,0
Cocinar, lavar alimentos y platos	-	-	-
Inodoro (b)	24,0	720,0	8.760,0
Lavar dientes	4,0	120,0	1.460,0
Lavar manos	7,0	210,0	2.555,0
Ducha (c)	-	-	-
Aseo (a)	1,6	49,0	596,2
Riego (a)	0,2	7,0	85,2
Total	39,1	1.172,0	14.259,3

(a) Usos al mes= 3

(b) descargas diarias= 4

(c) ducha en minutos= 5

Nota: Elaboración propia (2022).

el equivalente de consumo en m^3 es de:

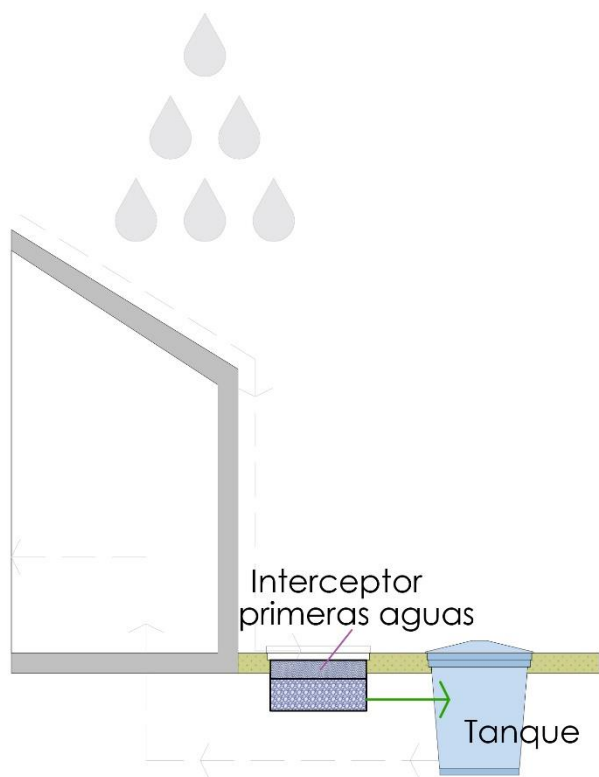
Tabla 14. Consumo agua de una persona (m^3)

Total	0,039	1,172	14,259
-------	-------	-------	--------

Nota: elaboración propia (2022).

Una vez cosechada el agua en los techos y conociendo el consumo de una persona en Colombia, se debe garantizar el suministro de agua potable en la vivienda, por lo tanto, es preciso el uso de tanques de almacenamiento con sus respectivos diseños de tamaños óptimos que permitan solventar las necesidades diarias del hogar (Fonseca et al., 2017).

Figura 20. Esquema de sistema de recolección de agua lluvia - Almacenamiento



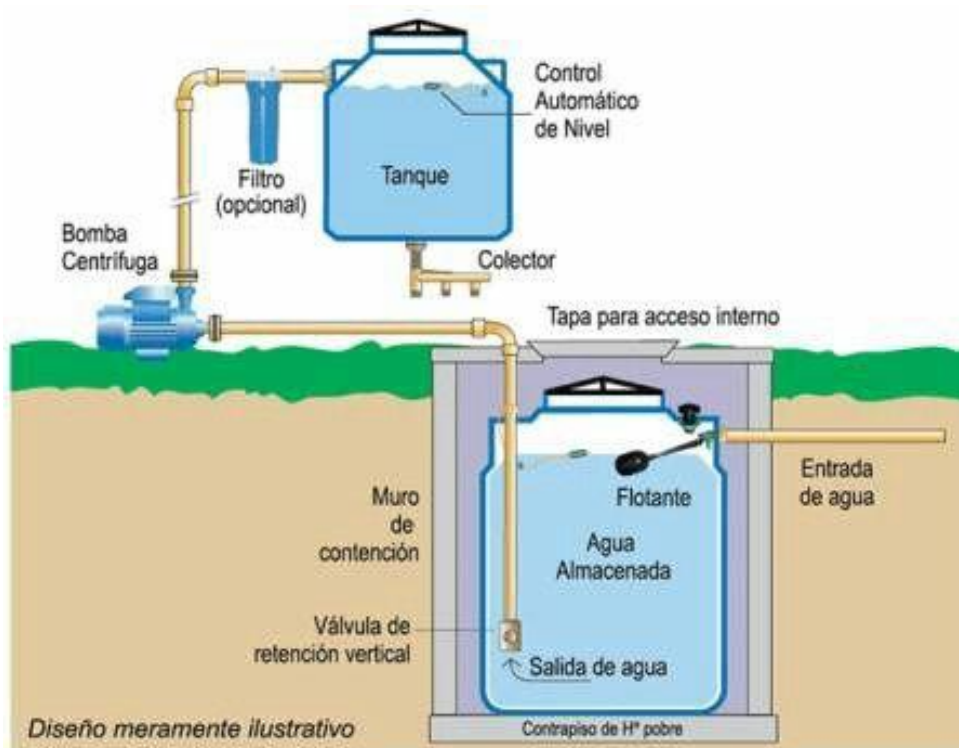
Nota Elaboración propia (2022)

Análisis de tanques

En las construcciones sostenibles que propenden por el aprovechamiento de aguas lluvias para el uso como agua potable o para usos domésticos con agua no potable como en sanitarios, aseo o riego, hay un componente que amerita una mayor atención en su dimensionamiento como lo es el tanque de almacenamiento de aguas lluvias, comparable con el corazón del sistema del cuerpo humano, ya que en éste dimensionamiento intervienen numerosas variables, que van desde la ubicación del proyecto, las condiciones hidrológicas de la zona; condiciones propias del diseño, como el tipo de cubiertas, la ubicación espacial del tanque; hasta la demanda de agua, costo del tanque, costo del agua, número de habitantes y aparatos para la edificación (Reyes & Rubio, 2014).

¿Tanque o cisterna? Mientras que las cisternas son diseñadas para uso subterráneo con protección de producto y de su contenido, los tanques son depósitos netamente exteriores. El uso exclusivo de la cisterna es de agua, en comparación del tanque que puede ser usado para agua y otras sustancias químicas como ácidos, cloruros, fosfatos, sustancias corrosivas y densas. Como mencionamos, los tanques pueden contener sustancias químicas por lo que están hechos de polietileno reforzado al 20 % y 40 %. Las cisternas también están hechas de polietileno, pero como no son reforzadas no pueden contener otra sustancia que no sea agua. Otra de las diferencias entre un tanque y cisterna es que el tanque tiene garantías de vida de 35 años promedio, mientras que la cisterna tiene una garantía de por vida.

Figura 21. Tipos de tanques



Nota: Tanques elevados y tanques cisterna, tomado de Pinterest

Un tanque para captación pluvial sea elevado o enterrado, generalmente está fabricado con tres capas de polietileno 100 % virgen. Incluye capa negra externa para mayor resistencia y protege de los rayos UV y Capa blanca interna con antibacterial. Empaque de neopreno para el tubo de entrada que impide el ingreso de partículas y contaminantes al agua almacenada. Incluye multiconector y conexiones de salida y rebalse.

Los precios de tanques varían principalmente según el tipo, la capacidad en m³ de almacenamiento y si el tanque es enterrado o elevado, o por cambios en el mercado, por lo tanto, los precios aquí mencionados pueden variar. Se toman precios en el mercado actual de páginas web oficiales que venden los productos.

Los tanques para agua para el hogar son fabricados con materiales reforzados para que no se filtre nada en ellos, así como para que no se oxiden ni corroan, en Colombia los tanques deben estar certificados por la Food and Drug Administration (FDA). Son altamente resistentes a las inclemencias del clima en los exteriores, es decir, un tanque de estos tendrá una vida útil y duradera aproximadamente de 35 años.

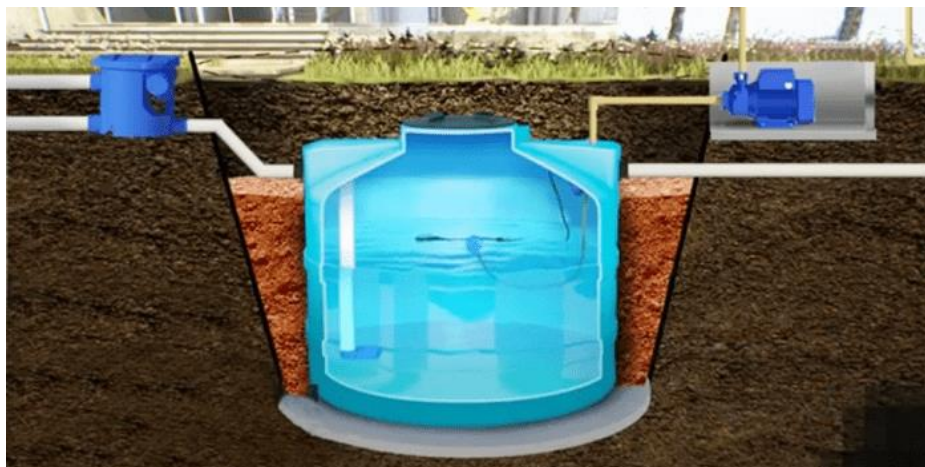
Figura 22. Tanque de almacenamiento de agua



Nota: Tanque almacenamiento agua de 1000 litros, tomado de www.rotoplas.com

Tanque elevado de poliéster reforzado con fibra de vidrio, cilíndrico, de 500 litros, para agua potable, con válvula de corte de compuerta de 1" DN 25 mm y válvula de flotador, para la entrada y válvula de corte de compuerta de 1" DN 25 mm para la salida. Costo directo \$ 350.786 COP, de 1000 litros \$ 465.900 COP, de 2000 litros \$ 638.900 COP, y de 5000 litros \$ 1.685.900 COP.

Figura 23. Tanque cisterna 1000 litros



Nota: Cisterna, tomado de www.rotoplas.com

Tanque de poliéster reforzado con fibra de vidrio, de 650 litros, de agua potable, para enterrar, con válvula de corte de compuerta de 1" DN 25 mm y válvula de flotador, para la entrada y válvula de corte de compuerta de 1" DN 25 mm para la salida. Costo directo \$ 658.060 COP, de 500 litros \$ 400.786 COP.

La importancia del Dimensionamiento óptimo del tanque, del buen uso de sistemas de suministro de agua y energía reside en los resultados de ahorro de agua potable del 20,5 % y un ahorro de energía del 62,54 % minimizando el capital inicial y el costo operativo del sistema. (Njepu et al., 2019)

Para el caso de estudio se usarán los tanques superficiales por tener características de alta protección y cuidado para el agua potable y por ser los de menor costo final. Al final se presentarán opciones que pueden mejorar arquitectónicamente el espacio de la vivienda.

El mantenimiento de los tanques como factor para garantizar buena calidad en el agua y evitar infecciones o enfermedades a quienes la consumen, se debe realizar en determinados periodos de tiempo para garantizar el correcto funcionamiento del sistema permitir que el agua se

pueda consumir y los materiales del tanque no se deteriore antes de lo estimado. Por lo tanto, existen empresas que realizan estos mantenimientos, y no solo se encargan de limpiar los tanques, sino también miden la calidad del agua a través de análisis de muestras que toman antes y después de la limpieza en promedio cobran \$ 260.417 COP por los tanques entre 500 litros y los 5000 litros.

Tabla 15. Resumen del análisis de tanques

Resumen del análisis de tanques					
Sistema	Material	Ventajas	Desventajas	Mantenimiento	Costo inicial
Tanque elevado	Plástico	Paredes reforzadas por lo que puede almacenar agua y sustancias químicas, capa interna antibacterial, facilidades para el mantenimiento	vida útil aproximadamente de 35 años	1 vez al año	Entre \$ 350,000 y \$ 1,700,000
Tanque cisterna	Plástico	Uso subterráneo con protección, capa interna antibacterial, vida útil aproximadamente de 65 años	Solo almacena agua	1 vez al año	Entre \$ 450,000 y \$ 2,400,000

Nota: elaboración propia (2024).

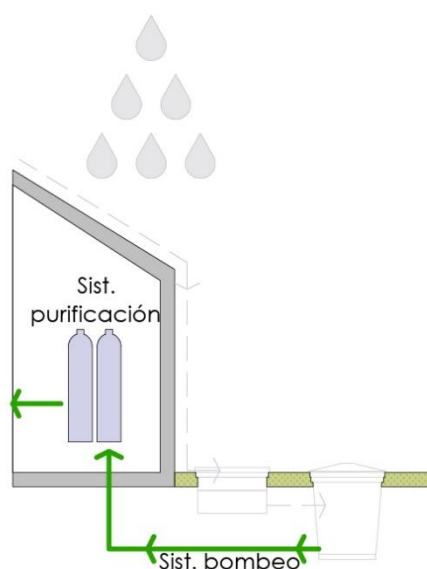
8.3. Investigaciones de Tratamiento y purificación de agua lluvia

Las aplicaciones no potables más aceptadas públicamente para el agua de lluvia cosechada son la descarga de sanitario, el riego de jardines y el uso en lavadoras (Roebuck et al., 2011). En este caso de estudio se divide en dos situaciones, las no potables y las potables, para el primer caso Roebuck consideró lo más apropiado para el agua de lluvia sería para las descargas del sanitario y lavar ropa, para el segundo caso únicamente será usada para beber (consumir), lavado de elementos de cocina y cocción de alimentos, la razón para elegir estos empleos del agua es por la alta demanda de estos. Las descargas sanitarias y lavado de ropa son regulares durante todo el año, en cambio el riego de jardinería solo se concentra en períodos secos cuando la disponibilidad de agua de lluvia es limitada. En segundo lugar, el uso del agua de lluvia recolectada para el lavado tiene el beneficio

adicional de reducir el consumo de detergente en polvo, ya que el agua de lluvia a menudo es más suave que el agua potable del grifo (Farreny et al., 2011), (Burkhard et al., 2000).

Aunque creamos que el agua de lluvia es relativamente limpia, las pruebas realizadas en laboratorios demuestran que en la composición del agua está contaminada con agentes físicos, químicos y microbiológicos. En un caso de estudio realizado durante dos años, se recogieron muestras de lluvia desde la primavera hasta el otoño de los siguientes materiales para techos: tejas de concreto, tejas de cerámica, chapa de acero galvanizado, y terraza con revestimiento de epoxi. La calidad física, química y microbiológica se evaluó en función del pH, la turbidez, la conductividad eléctrica, la concentración de compuestos biogénicos, la concentración de elementos elegidos, el número de *Escherichia coli* (e-coli) y el número de estreptococos fecales. Se identificó contaminación bacteriana significativa, disminución del pH y aumento de la turbidez en el agua, dependiendo de los parámetros del techo lavado por la lluvia y la intensidad y frecuencia de la precipitación (Zdeb et al., 2020). Con lo anterior, es posible purificar el agua lluvia en los edificios de vivienda con diferentes materiales como lo son los filtros, químicos limpiadores y purificantes, y la adecuación del sistema hidráulico para el consumo humano (Rozin et al., 2015)

Figura 24. Esquema de sistema de recolección de agua lluvia - Tratamiento



Nota: Elaboración propia (2022)

Análisis de tratamientos de agua lluvia

Una planta de purificación de agua lluvia dependiendo de su capacidad puede proporcionar la demanda total de agua potable de una casa, un edificio o un conjunto de edificios, tratar el agua de lluvia almacenada y cumplir con los estándares de calidad del agua potable para eliminar totalmente los problemas de calidad del agua primaria y secundaria identificados en el agua de lluvia almacenada, como coliformes totales, e-coli, mal sabor y olor. El mantenimiento es mínimo pero periódico y los resultados observados en este estudio sugieren la aplicación potencial de un proceso similar para proporcionar agua potable no solo a las viviendas, sino también a edificaciones comerciales, institucionales, oficinas, y zonas abiertas como parques. (Senevirathna et al., 2019)

Los precios de sistemas de purificación de agua varían principalmente según los modelos y la capacidad de filtración y purificación, además por instalaciones adicionales como tuberías o llaves de paso. Los precios de las bombas de agua varían principalmente según el tipo de vivienda y la potencia del motor para la bomba de agua, además por instalaciones adicionales como pisos o cambios en el mercado, por lo tanto, los precios aquí mencionados pueden variar. Se toman precios en el mercado actual de páginas web oficiales que venden los productos.

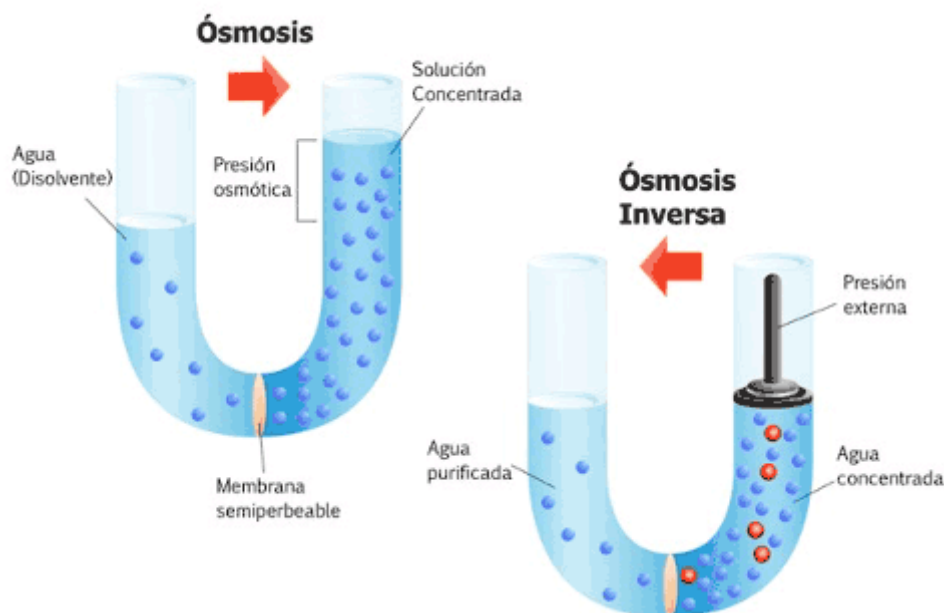
En Colombia hay dos maneras de adquirir el sistema de recolección y purificación de agua lluvia, la primera a través de empresas que vendan el sistema completo, es decir un tanque, filtros, y bomba hidráulica, pero no se encargan de las instalaciones de bajantes ni tuberías. La segunda posibilidad es contratar a un profesional, siendo necesario desglosar cada elemento del sistema para determinar un coste total de la instalación final. Para el análisis de costos se plantea comprobar la recuperación de la inversión inicial, teniendo en cuenta el ciclo de vida en los materiales o la vida útil de los dispositivos y mecanismos calculados entre los 20 y 60 años.

Purificación por Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es una tecnología de purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas y partículas más grandes en el agua potable. Para lograr la ósmosis inversa se aplica una presión para vencer la presión osmótica, que es una propiedad coligativa producida por diferencias de potencial químico del solvente, un parámetro termodinámico. La ósmosis inversa puede eliminar muchos tipos de elementos suspendidos en el agua, incluyendo bacterias, y está utilizada tanto en procesos industriales, agrícolas u otros, así como para la producción de agua potable. El resultado es que la disolución es retenida del lado presurizado de la membrana y el solvente puro puede pasar al otro lado. Para lograr la selectividad,

esta membrana no debe dejar pasar iones o moléculas grandes a través de sus poros (o agujeros), pero debe dejar pasar libremente componentes más pequeños de la solución (como las moléculas solventes). (Solis Valencia, 2019)

Figura 25. Diagrama osmosis inversa



Nota: Diagrama de ósmosis y ósmosis inversa, tomado de

<https://www.carbotecnica.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa/>

Existe un sistema prefabricado que realiza la ósmosis inversa en desde 2 hasta 6 etapas, siendo los más efectivos del mercado porque realiza un proceso en el que los sólidos inorgánicos disueltos (las sales) se eliminan del agua, esto se logra a través de un proceso de filtración en 4 etapas, en cada una de las etapas mencionadas se van eliminando los contaminantes dañinos y el agua va adquiriendo propiedades necesarias como beneficio. Desde la etapa 1 a la etapa 4, el agua

va perdiendo sedimentos, sabores, olores; la membrana de ósmosis inversa excluye virus, metales pesados y el 99.9 % de bacterias, la última etapa dota al agua de un mejor color, sabor y olor.

Paso 1. El agua pasa por un prefiltro de sedimentos que elimina sólidos en suspensión (tierra, barro, arena, óxidos, etc.) con un tamaño mayor de 5 micras.

Pasos 2 y 3. Pasa por dos prefiltros de carbón activado en bloque que absorben y eliminan el cloro y otros contaminantes químicos (pesticidas, aceites...) hasta un 99,9 % (según la publicidad de Grival - Colombia)

Paso 4. Mediante presión, filtramos el agua a través de una membrana semipermeable con poros microscópicos (como el riñón). La membrana rechaza los sólidos disueltos (sales) y otros contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, permitiendo solo el paso de las moléculas de agua (hidrogeno y oxigeno), H₂O agua pura.

Figura 26. Filtros 4 etapas osmosis inversa



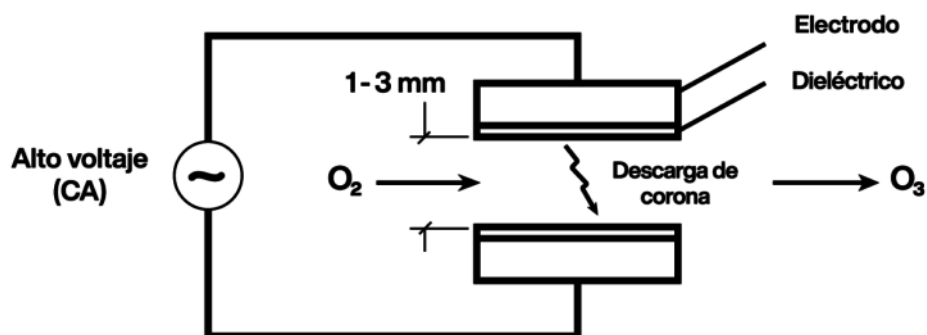
Nota: Filtro de agua de ósmosis inversa de 4 etapas, tomado de www.grival.com.

Filtro De Agua Ósmosis Inversa 4 Etapas Purificador 100gpd, rosca de 3/4", caudal de 0,4 m³/h, con dos llaves de paso de compuerta. Costo directo \$ 485.900 COP. Filtro de 5 etapa \$ 690.900 COP.

Purificación por Ozonificación

El ozono realiza la desinfección por oxidación química al igual que el cloro. Este puede eliminar bacterias, virus, algas, entre otros. Además, se utiliza el ozono para la oxidación del hierro y manganeso, y para la remoción de materia orgánica e inorgánica. El ozono genera una ruptura molecular de la membrana celular, provocando que el citoplasma celular se disperse para luego destruirlo. (Azabache Orellana, 2016)

Figura 27. Esquema de ozonificación



Nota: Esquema de ozonificación, tomado de www.carbotecnia.info

Los equipos de tratamiento de agua a base de ozono constan de dos etapas para una efectiva purificación del agua. La primera consta de microfiltración que retiene sedimentación, color, olor, sabor, y el cloro del agua. El agua del acueducto pasa a través un filtro 100 % de carbón activado, junto con una membrana de polideth para una mayor absorción de sedimentos y otros agentes

presentes en el agua, elaborado con materiales originales. La segunda etapa corresponde a la bactericida a base de ozono, luego de ser filtrada el agua, pasa por un avanzado sistema electrónico para la generación de ozono a partir del oxígeno ambiental, el ozono que se produce es conducido por una cámara donde se lleva a cabo la ozonización del agua por contacto, eliminando todo tipo de bacterias hongos y demás microorganismos presentes en el agua para una completa esterilización, apta para el consumo humano.

Figura 28. Purificador de agua ozonificador



Nota: ozonificador de agua, tomado de www.ozonolux.com

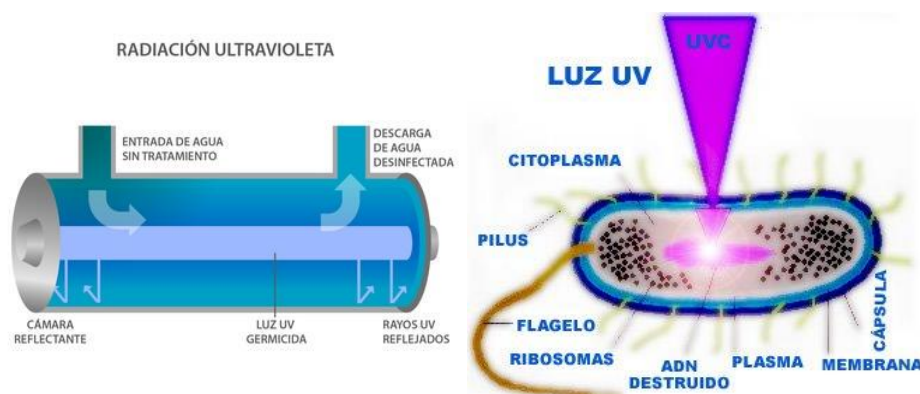
Filtro Purificador De Agua Ozono, rosca de 3/4", caudal de 0,4 m³/h, con dos llaves de paso de compuerta. Costo directo \$ 106.990 COP

Purificación por Luz Ultravioleta

La luz UV ofrece una desinfección del agua instantánea, segura, efectiva, es una opción ambientalmente adecuada, no cambia las propiedades del agua y no tiene efectos negativos. Ofreciendo el mejor costo – beneficio y está comprobada como una de las mejores formas de desinfección del agua.

Este método logra la remoción de microorganismos a través de la alteración del ADN de las células impidiendo su reproducción. La efectividad depende del tiempo de exposición, el mantenimiento del equipo, la calidad del agua y la intensidad de la lámpara para destruir la mayor cantidad de microorganismos. Generalmente, tiene una intensidad de lámpara entre 30000 y 50000 $\mu\text{wattseg}/\text{cm}^2$, pero existen otras bacterias que requieren una mayor intensidad para su remoción es por esto por lo que se debe verificar la intensidad de la lámpara del equipo UV antes de utilizarlo para el tratamiento del agua. También, es importante considerar que el agua debe haber sido filtrada con anterioridad antes de utilizar el equipo UV ya que el color, sólidos y turbiedad afectan la transmisión de la luz a los microorganismos (Azabache Orellana, 2016)

Figura 29. esquema UV



Nota: Izquierda esquema UV, derecha efecto sobre bacterias (tomado de www.agua-purificacion.blogspot.com)

No se debe apagar el sistema UV: Los sistemas con luz UV están diseñados para mantenerse encendidos las 24 horas del día, ya sea que lo utilice o que no. Las lámparas germicidas se gastan sin importar la cantidad de agua que fluye. Al mantener el equipo encendido, eliminará el riesgo que el agua contaminada pase a través de su sistema cuando este apagado.

Figura 30. Lámpara germicida de Luz Ultravioleta



Nota: imagen de Lámpara germicida de Luz Ultravioleta, tomado de www.agua-purificacion.blogspot.com

Lámpara Ultravioleta UV 6w Germicida Filtro De Agua Purificada, rosca de 3/4", caudal de 0,4 m³/h, con dos llaves de paso de compuerta. Costo directo \$ 195.000 COP.

Grupo de presión para distribución del agua

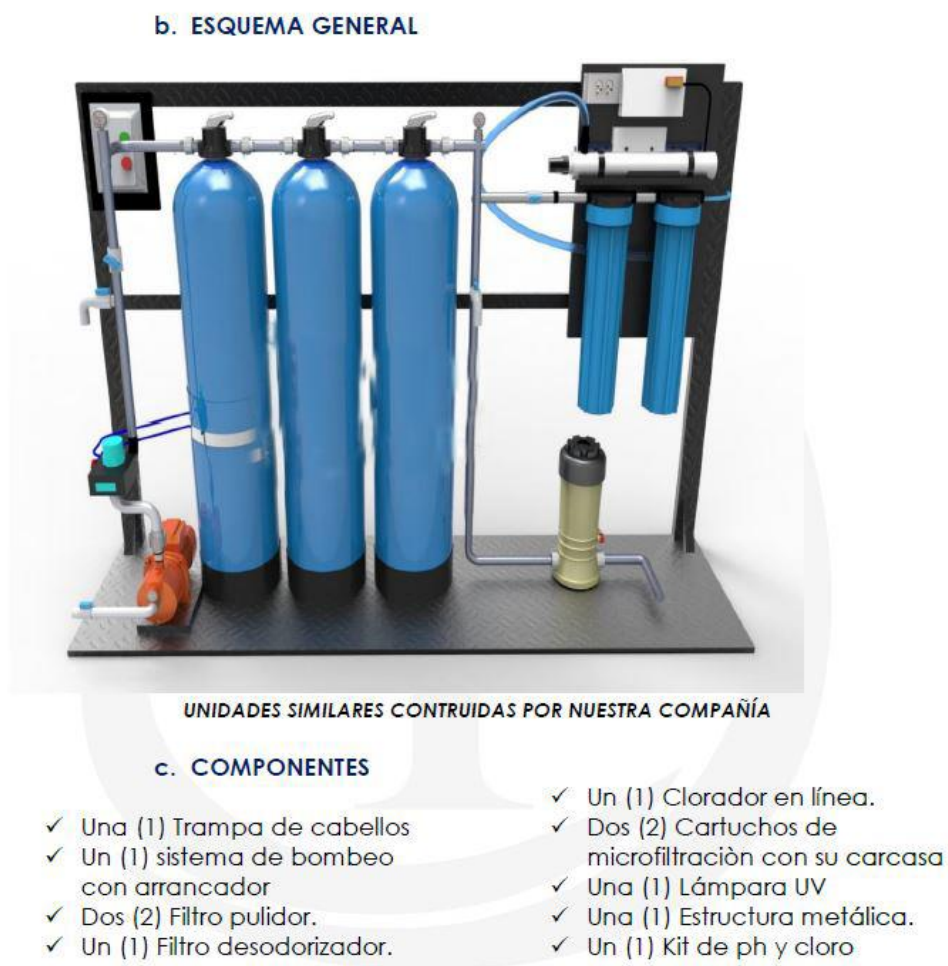
En los casos que existan tanques subterráneos o que el agua no tenga suficiente presión después de tanques ubicados en superficie, se requiere de un sistema de bombeo o también llamado grupo de presión, para el caso del uso doméstico el suministro de agua en aspiración con carga, formado por: electrobomba centrífuga monocelular horizontal de hierro fundido, monofásica a 230 V, con una potencia de 0,37 kW, con depósito acumulador de acero inoxidable esférico de 24 litros, con membrana recambiable, presostato, manómetro y racor de varias vías, y cable eléctrico de conexión con enchufe. Costo directo \$ 401.829 COP.

Equipos de purificación de agua lluvia

Existe en el mercado colombiano equipos completos de purificación y bombeo del agua lluvia listos para instalar, cuentan con sistemas eléctricos de encendido, manejo de la bomba de

agua y soportes a la medida de los tanques, es un kit de planta de tratamientos que puede tratar de 1000 a 2000 litros de agua por día, y un caudal de 0.1 LPS para abastecer las actividades de consumo de la vivienda caso de estudio. Costo directo \$ 5.094.860 COP.

Figura 31. Modelo Kit planta de tratamiento de agua lluvia



Nota: Modelo Kit planta de tratamiento de agua lluvia completo, tomado de Acuaplant

Tabla 16. Resumen del análisis de tratamiento y purificación

Resumen del análisis de tratamiento y purificación					
Sistema	Material	Ventajas	Desventajas	Mantenimiento	Costo inicial
Ósmosis inversa	filtros	recoge partículas grandes	Deja pasar partículas muy pequeñas	Cada 2 meses	Aprox. \$ 88,000
Sistema 4 a 5 filtros	filtros	recoge partículas grandes como sedimentos, excluye virus, metales pesados y el 99,9 % de bacterias, agua sin color, sabor ni olor	Mantenimiento de varios filtros	Cada 2 meses	Entre \$ 480,000 y \$ 690,000
Ozonificación	Ozonificador	Elimina bacterias, virus, algas entre otros, remoción de materia orgánica e inorgánica	Requiere de conexión eléctrica y un filtro de carbono antes de pasar por el ozonificador	Cada 2 meses	Aprox. \$ 110,000
Luz ultravioleta	Luz UV	no cambia las propiedades del agua y no tiene efectos negativos	Requiere de conexión eléctrica constante, el agua debe ser filtrada con anterioridad	1 vez al año	Aprox. \$ 200,000
Equipo de purificación prefabricado	filtros + luz UV + cloración	Tratamiento del agua de 1000 a 2000 litros de agua por día, fácil instalación, con filtros que eliminan partículas gruesas y delgadas, elimina bacterias, olores y sabores porque mezcla el sistema de filtros, luz UV y al final dosifica cloro para purificar el agua.	Mantenimiento de varios filtros	Cada 2 meses	Entre \$ 5,100,000 y \$ 10,600,000

Nota: elaboración propia (2024).

9. Definición y aplicación técnica y económica

Tras el análisis técnico y económico de cada una de las partes del sistema de recolección, las respectivas condiciones de los 3 escenarios planteados y las variables sobre la oferta de agua lluvia y la demanda dentro de los hogares en Santiago de Cali - Colombia, se reiteran las condiciones de los escenarios según el abastecimiento de una vivienda estrato 4, con 3 integrantes. El primer escenario corresponde al 100 % de abastecimiento de agua de lluvia, en otras palabras, cero consumos de agua potable desde la entidad prestadora del servicio. El segundo escenario con un abastecimiento de agua lluvia del 51.4 % y cero consumos de agua potable desde la entidad prestadora del servicio, debido al ahorro de agua. Y el tercer escenario solo consume el 18.6 % correspondiente a reducir actividades que sean abastecidas con agua lluvia y se requiera de la entidad prestadora del servicio para abastecer las actividades faltantes.

Los costos directos de cada parte del sistema fueron tomados según los precios en el mercado colombiano del año 2023, las precipitaciones del año 2022, estableciendo las definiciones técnicas de cada parte del sistema y los costos/beneficios para los consumos en el hogar descritas en este capítulo. Los costos a largo plazo (costos de operación y mantenimiento) son más difíciles de pronosticar (Roebuck et al., 2011) por ende, dichos costos se contabilizan bajo las siguientes consideraciones: costos de mantenimiento para limpiezas de cubiertas, tanques y filtros, daños en bombas hidráulicas, reemplazo de la bomba, reemplazo de filtros cada 12 meses según el fabricante, reemplazo del tanque de agua lluvia cada 35 años según el fabricante.

9.1. Definición y aplicación de cubiertas para la recolección de agua lluvia

Para el caso de estudio se define como parte del sistema ideal para la captación de lluvias, las tejas asfálticas, las cuales tienen un costo menor a las otras opciones, el mantenimiento se

realiza únicamente 1 vez al año por su durabilidad, incluso no requieren herramientas especializadas ni equipos que aumentan el costo indirecto haciéndola la teja ideal costo/beneficio, otro factor de esta teja es que no produce ruidos y se puede instalar sobre la estructura existente de otras tejas. El factor de escorrentía para las fórmulas es de 0,90. Teniendo en cuenta que el caso de estudio es una vivienda existente, se recomienda la limpieza de la cubierta instalada, por otro lado, la vivienda cuenta con losa en concreto (terraza) requiere de limpieza como parte del tratamiento del agua lluvia y así mantener la cubierta en óptimas condiciones. El factor de escorrentía sigue siendo 0,90. En el caso de que la cubierta o terraza tenga grietas y daños, requerirá de un tratamiento de impermeabilización y su costo lo deberá asumir el propietario.

Figura 32. Cubierta en asfalto.



Nota: Cubierta en asfalto y sus partes constructivas, Tomado de IKO.

Partiendo del hecho que en Santiago de Cali es una ciudad con “escases de agua” y que anualmente llueve 1483,40 mm, es el área de captación y el material de techo son los que marcan la diferencia para tener una cosecha de agua lluvia abundante y sin tantos contaminantes. La cosecha de agua lluvia aplica para los 3 escenarios propuestos debido a que es la misma superficie

de captación la cual va a recibir el agua lluvia, esta captación se describe con los siguientes datos en donde Ppi son las precipitaciones promedio mensual, Ac el área del techo de captación en m², y Ce el factor o coeficiente de esorrentía.

Tabla 17. Datos para captación de agua lluvia en 3 escenarios

Captación agua lluvia VIVIENDA		
	Datos	
	cantidad	Und
climograma de lluvias anual	1.483,40	mm o L/m ²
Ppi	123,62	mm o L/m ²
Ac	160,00	m ²
Ce	0,90	

Nota: Elaboración propia (2023)

Logrando una captación mensual consecuente con la lluvia que cae en Cali cada mes según los datos del IDEAM, en la cual se aplica la fórmula de oferta que es igual a precipitaciones promedio mensual por el área del techo y el factor de esorrentía dividido entre 1000, para obtener metros cúbicos

Tabla 18. Precipitación y Oferta mensual de agua lluvia en 3 escenarios

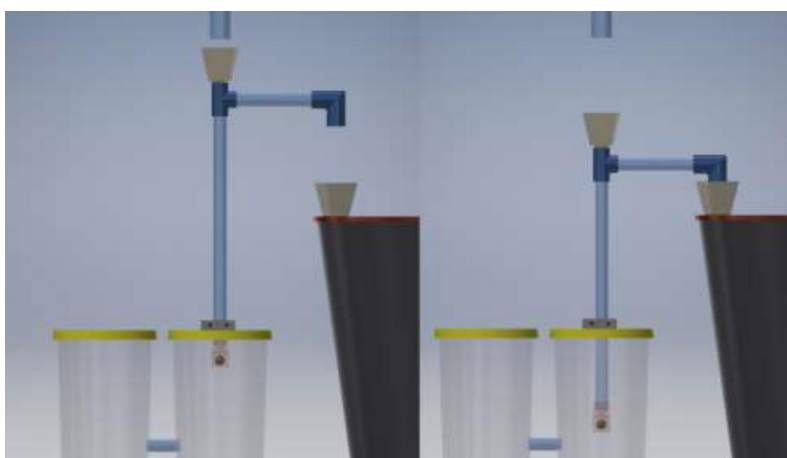
Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= (Ppi*Ce*Ac)/1000 m ³	14,79	15,76	21,54	27,55	23,43

30	31	31	30	31	30	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76

Nota: Elaboración propia (2023)

Una vez terminado el proceso de captación del agua lluvia en la cubierta, el agua baja por los conductos y antes de depositarse en los tanques de almacenamiento, interviene el mecanismo de separación de agua lluvia, para este paso se decide tomar el diseño realizado por (Moreno Lozano, 2020) quien propuso un mecanismo de separación de volumen variable el cual deberá separar 0.2 mm de agua por cada metro cuadrado de techo.

Figura 33. Volumen de separación variable



Nota: tomado de Tesis Metodología de dimensionamiento de sistemas de recolección de aguas lluvias

Para el caso de estudio se asume que la cubierta de teja asfáltica y losa en concreto se encuentran en buen estado, por ende, los costos se determinan para el mantenimiento y limpieza de la cubierta, canaletas y bajantes, además de los costos directos para la malla plástica que será puesta en la canaleta y la compra del sistema de separación de agua lluvia relacionados en la siguiente tabla.

Tabla 19. Resumen costos cubiertas escenario 1 al 3

Costos cubiertas Escenario 1 al 3	
Costo und/m ²	
Materiales	directo
Mantenimiento cubierta	\$ 95.000
Malla plástica para canaleta PVC	\$ 53.600
Tanque primera recolección 20 lt	\$ 15.900
Sistema de llenado Valvula+flotador	\$ 96.800
única inversión	\$ 261.300

Nota: Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos serán los de mantenimiento posteriores anuales equivalente a un día de trabajo de un obrero más materiales y equipo de trabajo en \$95.000 COP aproximadamente.

Finalmente, el ciclo de vida estimado para los componentes que se deben instalar para la recolección de agua lluvia es de 30 años promedio, haciendo una única inversión inicial de \$ 166.300 COP.

Tabla 20. Evaluación económica escenario 1, 2 y 3

Evaluación Económica - escenario 1, 2 y 3				
	costos materiales			
	valor unitario	cantidades	valor total	ciclo de vida
Malla plástica para canaleta PVC	\$ 53.600	1	\$ 53.600	30 años
Sistema de recolección de primeras aguas*	\$ 112.700	1	\$ 112.700	30 años
*Tanque 20 llt	\$ 15.900			30 años
*Sistema de llenado Valvula+flotador	\$ 96.800			30 años
			\$ 166.300	30 años

Nota: Ciclo de vida recolección agua lluvia. Elaboración propia (2023)

9.2. Definición de almacenamiento de agua lluvia

Escenario 1

Partiendo del primer escenario, en el cual los 3 integrantes consumen cada uno 0.21 m³ o 0.63 m³ diarios en total, esta propuesta abastece el 100 % del consumo en el hogar: Lavadora, hidratación, cocinar, lavar platos, inodoro, lavar manos, dientes, ducha, aseo y riego sin necesitar

a EMCALI para abastecer la casa, equivalente a un ahorro económico y de agua del 100

% del servicio de la empresa pública o lo que son aproximadamente \$658.000 pesos anuales.

Tabla 21. Consumo y costos del agua potable por persona línea base, escenario 1

	Consumo de agua en el hogar - línea base consumo del 100%			Evaluación Económica		
	consumo m ³ / persona			Costo EMCALI		
	diario	mensual	anual	Valor consumo	total mes	total año
Lavadora (a)	0,0166	0,4994	6,0756	\$ 6.128,18	\$ 4.794	\$ 58.033
Hidratación	0,0022	0,0660	0,8030	\$ 6.128,18	\$ 2.138	\$ 25.722
Cocinar, lavar alimentos y platos	0,0520	1,5600	18,9800	\$ 6.128,18	\$ 11.293	\$ 137.114
Inodoro (b)	0,0360	1,0800	13,1400	\$ 6.128,18	\$ 8.352	\$ 101.325
Lavar dientes	0,0080	0,2400	2,9200	\$ 6.128,18	\$ 3.204	\$ 38.695
Lavar manos	0,0210	0,6300	7,6650	\$ 6.128,18	\$ 5.594	\$ 67.774
Ducha (c)	0,0725	2,1750	26,4625	\$ 6.128,18	\$ 15.062	\$ 182.968
Aseo (a)	0,0016	0,0490	0,5962	\$ 6.128,18	\$ 2.034	\$ 24.455
Riego (a)	0,0002	0,0070	0,0852	\$ 6.128,18	\$ 1.776	\$ 21.323
Total	0,21	6,31	76,73	\$ 6.128,18	\$ 54.247	\$ 657.409

(a) Usos al mes= 3

(b) descargas diarias= 4

(c) ducha en minutos= 15

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

En la siguiente tabla se evidencia la cantidad de lluvia anual en Santiago de Cali medida en mm, las precipitaciones promedio mensual (Ppi), el área del techo de captación en m² (Ac) el factor o coeficiente de esorrentía (Ce), Numero de personas que habitan la casa, artefactos para alimentar con el agua de lluvia en m³/día, finalmente la multiplicación entre los artefactos por personas en m³/día. En seguida para determinar la oferta del agua (Ai) en m³, se debe multiplicar la precipitación promedio mensual por el factor de esorrentía por el área de techo y esto dividirlo entre 1000.

Tabla 22. Datos para captación de agua lluvia, escenario 1

capacidad del tanque agua lluvia escenario 1		
	Datos	
	cantidad	Und
climograma de lluvias anual	1.483,40	mm o L/m ²
Ppi	123,62	mm o L/m ²
Ac	160,00	m ²
Ce	0,90	
Numero de personas	3	
artefactos para alimentar	0,21	m ³ /dia
artefactos * personas	0,63	m ³ /dia

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

La oferta se mantiene igual en todos los casos de 17.80 m³

Tabla 23. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 1

$Ai = (Ppi * Ce * Ac) / 1000$	17,80	m ³
-------------------------------	-------	----------------

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

De los anteriores datos podemos identificar la demanda diaria en litros (L) y metros cúbicos (m³)

Tabla 24. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 1

Demanda diaria	630,64	lt
Demanda diaria	0,63	m ³
Área del techo	160,00	m ²

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Para definir el tamaño del tanque en el primer escenario, es necesario aplicar la fórmula de la oferta de agua lluvia en cada mes del año teniendo en cuenta las lluvias mensuales dadas por el IDEAM en la ciudad de Santiago de Cali. Calcular la demanda diaria, esto se logra multiplicando la demanda diaria calculada en la tabla anterior por los días del mes, ejemplo: enero tiene 31 días, $0.63 * 31 \text{ días} = 19.55 \text{ m}^3$, febrero 28 días, $0.63 * 28 = 17.66 \text{ m}^3$, así por todo el año. En seguida se

obtiene la diferencia entre oferta y demanda, en este caso se obtienen valores negativos

en los meses de sequía, quiere decir que dentro de la vivienda habrá meses en los que se consume más agua de la que se puede abastecer, aunque es posible acumular agua desde los meses anteriores.

Tabla 25. Captación mensual de agua lluvia en escenario 1

Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= (Ppi*Ce*Ac)/1000 m ³	14,79	15,76	21,54	27,55	23,43
Demandai= Dd*días mesi m ³	19,55	17,66	19,55	18,92	19,55
Diferencia= Ofertai - Demandai m ³	-4,76	-1,90	1,99	8,63	3,88
Diferencia acumulada m ³	0,00	0,00	1,99	10,63	14,51

30	31	31	30	31	30	31	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29	102,70
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76	14,79
18,92	19,55	19,55	18,92	19,55	18,92	19,55	19,55
-6,05	-10,48	-12,20	-4,09	3,59	5,59	-0,79	-4,76
8,46	-2,01	-12,20	-4,09	3,59	9,18	8,39	3,63

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

El tamaño del tanque corresponde al de mayor capacidad según la demanda debido a que el área y la cantidad de agua recolectada nunca superará la oferta y tener un tanque más grande representa un gasto adicional, en este caso tendremos un desbordamiento la mayoría de los meses y faltará llenarlo en meses de sequía. Comercialmente no existe un tanque con capacidad de 19.55 m³, lo que más se acerca son 4 tanques de 5 m³ para 20 m³, o 3 de 5 m³ + 4 de 2 m³ + 1 de 0.5 m³ para un total de 19.5 m³

Tabla 26. Tanque óptimo escenario 1

Tanque deseado por oferta m ³	27,55
Tanque deseado lt	27.552,00
Tanque deseado por demanda m ³	19,55
Tanque deseado lt	19.549,73

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

El consumo anual de 0.63 m² por 365 días (230.18 m³) equivale al 100 % del consumo de tres personas, y la oferta anual del tanque de 19.55 m³ por 12 meses (330.62 m³) es el 102 % de la necesidad de la vivienda que el tanque puede almacenar, en otras palabras, el tanque puede abastecer el 102 % de la necesidad de la vivienda.

Tabla 27. Porcentaje de captación del tanque óptimo escenario 1

Consumo anual	230,2	100
Oferta anual	234,60	101,92

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Tabla 28. Captación mensual con tanque deseado en escenario 1

Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= (Ppi*Ce*Ac)/1000 m ³	14,79	15,76	21,54	27,55	23,43
Tanque deseado por oferta m³	19,55	19,55	19,55	19,55	19,55
Acumulación m ³	-4,76	-3,79	1,99	8,00	3,88
Diferencia acumulada m ³	0,00	0,00	1,99	8,00	3,88

30	31	31	30	31	30	31	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29	102,70
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76	14,79
19,55	19,55	19,55	19,55	19,55	19,55	19,55	19,55
-6,68	-10,48	-12,20	-4,72	3,59	4,95	-0,79	-4,76
0,00	0,00	0,00	0,00	3,59	4,95	0,00	0,00

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Los costos directos para la compra de los tanques necesarios para la recolección de agua lluvia se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero en este escenario eso sería muy costoso como se observa a continuación, por lo que se propone tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 29. Resumen costos tanques escenario 1

Costos tanques Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (5m ³) x 4 und	\$ 6.743.600
Tanque de superficie 2 (5m ³) x 4 und	\$ 6.743.600
única inversión	\$ 13.487.200

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Tabla 30. Resumen costos ajustado escenario 1

Costos tanques ajustado Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (5m ³) x 4 und	\$ 6.743.600
única inversión	\$ 6.743.600

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 1.041.668 cada año por los 4 tanques de 5 m³.

Tabla 31. Resumen costos mantenimiento tanques escenario 1

Costos mantenimiento tanques Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque (5m ³) x 4 und	\$ 1.041.668
anual	\$ 1.041.668

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Escenario 2

El segundo escenario, mantenemos los 3 integrantes, y consumen cada uno 0.11 m³ o 0.32 m³ diarios en total, esta propuesta abastece el 100 % del consumo en el hogar respecto a la línea base: Lavadora, hidratación, cocinar, lavar platos, inodoro, lavar manos, dientes, ducha, aseo y riego sin necesitar a EMCALI para abastecer la casa, pero consume 57,6 % equivalente a un ahorro de agua de 42.4 % y del 100 % del ahorro económico del servicio de la empresa pública o lo que son aproximadamente \$429.000 pesos anuales.

Tabla 32. Consumo y costos del agua potable por persona familia ahorradora, escenario

2

Consumo de agua en el hogar - familia ahorradora consumo del 51,4%				Evaluación Económica		
	consumo m ³ / persona			Costo EMCALI		
	diario	mensual	anual	Valor consumo	total mes	total año
Lavadora (a)	0,0056	0,1669	2,0311	\$ 6.128,18	\$ 2.756	\$ 33.248
Hidratación	0,0022	0,0660	0,8030	\$ 6.128,18	\$ 2.138	\$ 25.722
Cocinar, lavar alimentos y platos	0,0260	0,7800	9,4900	\$ 6.128,18	\$ 6.513	\$ 78.958
Inodoro (b)	0,0240	0,7200	8,7600	\$ 6.128,18	\$ 6.146	\$ 74.484
Lavar dientes	0,0040	0,1200	1,4600	\$ 6.128,18	\$ 2.469	\$ 29.748
Lavar manos	0,0070	0,2100	2,5550	\$ 6.128,18	\$ 3.020	\$ 36.459
Ducha (c)	0,0375	1,1250	13,6875	\$ 6.128,18	\$ 8.628	\$ 104.681
Aseo (a)	0,0016	0,0490	0,5962	\$ 6.128,18	\$ 2.034	\$ 24.455
Riego (a)	0,0002	0,0070	0,0852	\$ 6.128,18	\$ 1.776	\$ 21.323
Total	0,108	3,244	39,468	\$ 6.128,18	\$ 35.480	\$ 429.077

(a) Usos al mes= 3
(b) descargas diarias= 4
(c) ducha en minutos= 5

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Se aplican los mismos datos del escenario 1 excepto por los artefactos para alimentar, debido a que son constantes para los cálculos: clima de lluvias anuales (mm), precipitaciones promedio mensual (Ppi), el área del techo de captación en m^2 (Ac) el factor o coeficiente de escorrentía (Ce), Numero de personas que habitan la casa, artefactos para alimentar con el agua de lluvia en $m^3/día$, finalmente la multiplicación entre los artefactos por personas en $m^3/día$. En seguida para determinar la oferta del agua (Ai) en m^3 , se debe multiplicar la precipitación promedio mensual por el factor de escorrentía por el área de techo y esto dividirlo entre 1000.

Tabla 33. Datos para captación de agua lluvia, escenario 2

capacidad del tanque agua lluvia escenario 2		
	Datos	
	cantidad	Und
climograma de lluvias anual	1.483,40	mm o L/ m^2
Ppi	123,62	mm o L/ m^2
Ac	160,00	m^2
Ce	0,90	
Numero de personas	3	
artefactos para alimentar	0,11	m^3/dia
artefactos * personas	0,32	m^3/dia

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

La oferta se mantiene igual en todos los casos de $17.80 m^3$. De los anteriores datos podemos identificar la demanda diaria en litros (L) y metros cúbicos (m^3)

Tabla 34. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 2

Demanda diaria	324,39	lt
Demanda diaria	0,32	m^3
Área del techo	160,00	m^2

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Para definir el tamaño del tanque, nuevamente se aplica la fórmula de la oferta de agua lluvia en cada mes del año. Calcular la demanda diaria por todo el año. Obtener la diferencia entre oferta y demanda, en este caso la mayoría de los resultados son positivos y solo en 2 meses los valores son negativos, quiere decir que en los meses que más llueve es posible acumular agua y abastecer completamente de agua lluvia las necesidades de la vivienda.

Tabla 35. Captación mensual de agua lluvia en escenario 2

Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= $(P_{pi} * C_e * A_c) / 1000$ m ³	14,79	15,76	21,54	27,55	23,43
Demandai= $D_d * \text{días mes}$ m ³	10,06	9,08	10,06	9,73	10,06
Diferencia= Ofertai - Demandai m ³	4,73	6,68	11,49	17,82	13,38
Diferencia acumulada m ³	4,73	11,41	22,90	40,72	54,10
Diferencia acumulada CORREG m ³	0,00	0,00	18,17	35,99	49,36

30	31	31	30	31	30	31	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29	102,70
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76	14,79
9,73	10,06	10,06	9,73	10,06	9,73	10,06	10,06
3,14	-0,98	-2,71	5,10	13,08	14,77	8,71	4,73
57,24	56,25	53,54	58,64	71,73	86,50	95,21	99,94
52,50	51,52	48,81	53,91	66,99	81,77	90,47	95,21

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

El tamaño del tanque corresponde al de mayor capacidad según la demanda debido a que el área y la cantidad de agua recolectada nunca superará la oferta y tener un tanque más grande representa un gasto adicional, en este caso tendremos un desbordamiento la mayoría de meses y no faltará llenarlo en meses de sequía. Comercialmente existe un tanque con capacidad de 10.00 m³, pero su costo y ubicación en una vivienda no es viable, por lo que se opta por 2 tanques de 5 m³ para 10 m³.

Tabla 36. Tanque óptimo escenario 2

Tanque deseado por oferta m ³	27,55
Tanque deseado lt	27.552,00
Tanque deseado por demanda m ³	10,06
Tanque deseado lt	10.056,22

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Estos tanques pueden almacenar 102 % de la necesidad de la vivienda, los meses de sequías va a faltar muy poca agua para suplir que se puede completar con el agua la de los servicios públicos

Tabla 37. Porcentaje de captación del tanque óptimo escenario 2

Consumo anual	230,2	100
Oferta anual	234,60	101,92

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Tabla 38. Captación mensual con tanque deseado en escenario 2

Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= (Ppi*Ce*Ac)/1000 m ³	10,06	15,76	21,54	27,55	23,43
Tanque deseado por demanda m³	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06
Acumulación m ³	0,00	5,71	11,49	17,50	13,38
Diferencia acumulada CORREG m ³	0,00	0,00	17,19	34,69	48,07

30	31	31	30	31	30	31	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29	102,70
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76	14,79
10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06
2,81	-0,98	-2,71	4,78	13,08	14,45	8,71	4,73
50,88	49,90	0,00	0,00	17,86	32,31	41,01	45,75

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Los costos directos para la compra de los tanques necesarios para la recolección de agua lluvia se relacionan en la siguiente tabla también, igual al anterior escenario lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero eso sería muy costoso, por lo que se propone tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 39. Resumen costos tanques escenario 2

Costos tanques Escenario 2	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (5m ³) x 2 und	\$ 3.371.800
Tanque de superficie 2 (5m ³) x 2 und	\$ 3.371.800
única inversión	\$ 6.743.600

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Tabla 40. Resumen costos ajustado escenario 2

Costos tanques ajustado Escenario 2	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (5m ³) x 2 und	\$ 3.371.800
única inversión	\$ 3.371.800

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 520.834 cada año para 2 tanques de 5 m³.

Tabla 41. Resumen costos mantenimiento tanques escenario 2

Costos mantenimiento tanques Escenario 2	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque (5m ³) x 2 und	\$ 520.834
anual	\$ 520.834

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Escenario 3

En el tercer escenario los 3 integrantes consumen 0.12 m³ al día, y se abastece 18.6 % de las necesidades: hidratación, inodoro, aseo personal, aseo general y riego, ya no están: Lavadora, cocinar, lavar platos, las cuales van a requerir suplirse con EMCALI, equivalente a un ahorro de agua del 18.6 % del servicio de la empresa pública y un ahorro aproximado de \$275.000 pesos anuales.

Tabla 42. Consumo y costos del agua potable por persona familia ahorradora, escenario

3

Consumo de agua en el hogar - familia ahorradora consumo del 18,6%				Evaluación Económica		
	consumo m ³ / persona			Costo EMCALI		
	diario	mensual	anual	Valor consumo	total mes	total año
Lavadora (a)	-	-	-			
Hidratación	0,0022	0,0660	0,8030	\$ 6.128,18	\$ 3.005	\$ 36.123
Cocinar, lavar alimentos y platos	-	-	-			
Inodoro (b)	0,0240	0,7200	8,7600	\$ 6.128,18	\$ 7.012	\$ 84.884
Lavar dientes	0,0040	0,1200	1,4600	\$ 6.128,18	\$ 3.336	\$ 40.149
Lavar manos	0,0070	0,2100	2,5550	\$ 6.128,18	\$ 3.887	\$ 46.859
Ducha (c)	-	-	-			
Aseo (a)	0,0016	0,0490	0,5962	\$ 6.128,18	\$ 2.900	\$ 34.855
Riego (a)	0,0002	0,0070	0,0852	\$ 6.128,18	\$ 2.643	\$ 31.724
Total	0,039	1,172	14,259	\$ 6.128,18	\$ 22.783	\$ 274.594

(a) Usos al mes= 3
(b) descargas diarias= 4
(c) ducha en minutos= 5

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Mantenemos los mismos datos principales de los escenarios anteriores excepto por los artefactos para alimentar, debido a que son constantes para los cálculos: clima de lluvias anuales (mm), precipitaciones promedio mensual (Ppi), el área del techo de captación en m² (Ac) el factor o coeficiente de escorrentía (Ce), Numero de personas que habitan la casa, artefactos para alimentar con el agua de lluvia en m³/día, finalmente la multiplicación entre los artefactos por

personas en $\text{m}^3/\text{día}$. En seguida para determinar la oferta del agua (A_i) en m^3 , se debe multiplicar la precipitación promedio mensual por el factor de escorrentía por el área de techo y esto dividirlo entre 1000.

Tabla 43. Datos para captación de agua lluvia, escenario 3

capacidad del tanque agua lluvia escenario 3		
	Datos	
	cantidad	Und
climograma de lluvias anual	1.483,40	mm o L/m^2
Ppi	123,62	mm o L/m^2
Ac	160,00	m^2
Ce	0,90	
Numero de personas	3	
artefactos para alimentar	0,04	$\text{m}^3/\text{día}$
artefactos * personas	0,12	$\text{m}^3/\text{día}$

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

La oferta se mantiene igual en todos los casos de 17.80 m^3 . De los anteriores datos podemos identificar la demanda diaria en litros (L) y metros cúbicos (m^3)

Tabla 44. Demanda del agua potable por 3 personas, escenario 3

Demanda diaria	117,20	lt
Demanda diaria	0,12	m^3
Área del techo	160,00	m^2

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Para definir el tamaño del tanque del tercer escenario, volvemos a aplicar la fórmula de la oferta de agua lluvia en cada mes del año teniendo en cuenta las lluvias mensuales dadas por el IDEAM en la ciudad de Santiago de Cali. Calcular la demanda diaria. Obtener la diferencia entre oferta y demanda, en este caso durante todo el año se obtienen valores positivos, quiere decir que hay suficiente agua lluvia recolectada para abastecer la vivienda.

Tabla 45. Captación mensual de agua lluvia en escenario 3

Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= (Ppi*Ce*Ac)/1000 m ³	14,79	15,76	21,54	27,55	23,43
Demandai= Dd*días mesi m ³	3,63	3,28	3,63	3,52	3,63
Diferencia= Ofertai - Demandai m ³	11,16	12,48	17,91	24,04	19,80
Diferencia acumulada m ³	11,16	23,64	41,55	65,58	85,38

30	31	31	30	31	30	31	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29	102,70
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76	14,79
3,52	3,63	3,63	3,52	3,63	3,52	3,63	3,63
9,35	5,44	3,71	11,32	19,51	20,99	15,13	11,16
94,74	100,18	103,89	115,21	134,71	155,70	170,83	181,99

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

El tanque máximo para el tercer escenario sería de 3.63 m³ correspondiente a la demanda. En este caso tendremos un desbordamiento todos los meses porque la oferta es mucho mayor a la demanda. Comercialmente existe un tanque con capacidad de 3.63 m³, pero es posible tener 2 tanques de 2 m³ para 4 m³, o 1 de 2 m³ + 1 de 1 m³ + 1 de 0.5 m³ para un total de 3.5 m³

Tabla 46. Tanque óptimo escenario 3

Tanque deseado por oferta m ³	27,55
Tanque deseado lt	27.552,00
Tanque deseado por demanda m ³	3,63
Tanque deseado lt	3.633,20

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Este tanque puede almacenar 102 % de la necesidad planteadas en este escenario, incluso en los meses de sequías puede suplir la necesidad de agua.

Tabla 47. Porcentaje de captación del tanque óptimo escenario 3

Consumo anual	42,8	100
Oferta anual	43,60	101,92

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Tabla 48. Captación mensual con tanque deseado en escenario 3

Días del mes	31	28	31	30	31
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Precipitación (mm)	102,70	109,45	149,61	191,33	162,74
Ofertai= (Ppi*Ce*Ac)/1000 m ³	14,79	15,76	21,54	27,55	23,43
Tanque deseado por demanda m³	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
Acumulación m ³	11,16	12,13	17,91	23,92	19,80
Diferencia acumulada m ³	11,16	23,28	41,19	23,92	43,72

30	31	31	30	31	30	31	31
Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
89,38	63,00	51,02	103,00	160,70	170,17	130,29	102,70
12,87	9,07	7,35	14,83	23,14	24,50	18,76	14,79
3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
9,24	5,44	3,71	11,20	19,51	20,87	15,13	11,16
52,96	58,40	62,11	73,31	92,82	113,69	128,82	139,97

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Los costos directos para la compra de los tanques necesarios para la recolección de agua lluvia se relacionan en la siguiente tabla, ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, para este escenario es posible, pero al igual que en los anteriores escenarios para mantener las mismas condiciones, se propone tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 49. Resumen costos tanques escenario 3

Costos tanques Escenario 3	
Costo und/m ²	
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (2m ³) x 2 und	\$ 1.277.800
Tanque de superficie 2 (2m ³) x 2 und	\$ 1.277.800
única inversión	\$ 2.555.600

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Tabla 50. Resumen costos ajustado escenario 3

Costos tanques ajustado Escenario 3	
Costo und/m ²	
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (2m ³) x 2 und	\$ 1.277.800
única inversión	\$ 1.277.800

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$520.834 cada año para 2 tanques de 2 m³.

Tabla 51. Resumen costos mantenimiento tanques escenario 3

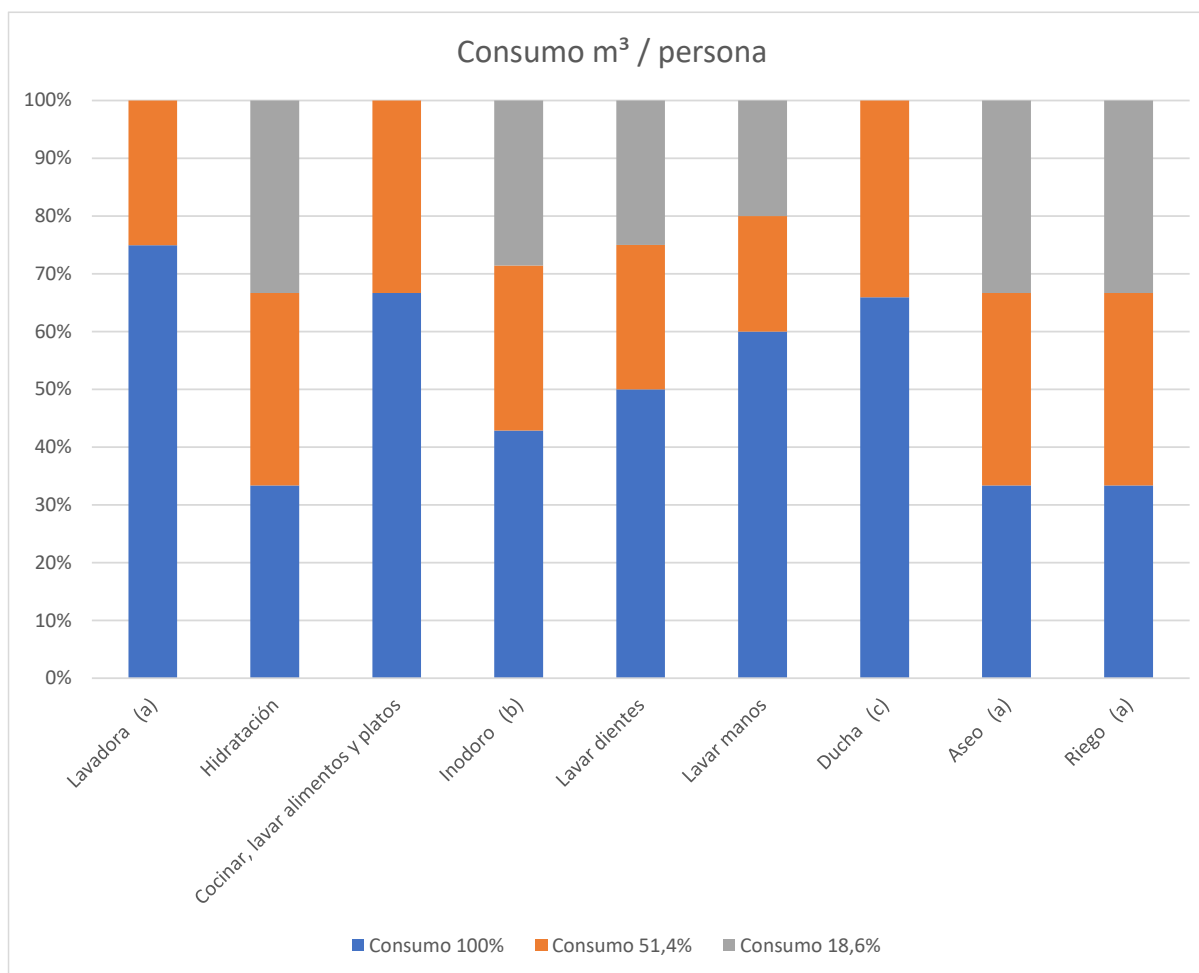
Costos mantenimiento tanques Escenario 3	
Costo und/m ²	
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque (2m ³) x 2 und	\$ 520.834
anual	\$ 520.834

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

9.3. Definición técnica del tratamiento y purificación

Teniendo en cuenta el consumo en el hogar planteado en el análisis técnico y cotejando la información del abastecimiento según cada escenario propuesto, en los tres casos se contempla la hidratación, por lo que requiere de un sistema de purificación para el consumo humano.

Figura 34. Comparación del consumo por persona en vivienda



Nota: Elaboración propia (2022)

Escenario 1 y 2

En los escenarios 1 y 2 se elige el montaje individual de un sistema de purificación de agua lluvia (PTALL) que tenga un caudal aproximado de 1 litro por segundo (1 LPS) solo se debe instalar un módulo prefabricado con todos los componentes listos para usarse y la garantía estaría a cargo de un único proveedor, el sistema de purificación en estos dos escenarios es el Kit de planta de tratamiento de agua lluvia completo con un costo de \$ 5.094.860 COP, es un sistema completo y de fácil mantenimiento. La ubicación del módulo se haría cerca o al lado de los tanques para no

tener que forzar la entrada del agua con una motobomba adicional y que por gravedad funcionen los filtros.

Figura 35. Modelo planta de tratamiento de agua lluvia



Nota: Modelo Kit planta de tratamiento de agua lluvia completo, tomado de Eduardoño

Es necesario contratar el mantenimiento con la misma empresa proveedora para mantener las garantías.

Tabla 52. Resumen costos PTALL escenario 1 y 2

Costos potabilización Escenario 1 y 2	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
PTALL Eduardoño 0.1 LPS	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 5.094.860

Nota: Escenarios 1 y 2. Elaboración propia (2023)

Tabla 53. Resumen costos mantenimiento PTALL escenario 1 y 2

Costos mantenimiento potabilización Escenario 1 y 2	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento PTALL	\$ 1.220.000
anual	\$ 1.220.000

Nota: Escenarios 1 y 2. Elaboración propia (2023)

Escenario 3

A diferencia de los dos anteriores escenarios, en el tercero se opta por un sistema más sencillo de bajo caudal y económico porque no será usado para lavar ropa, la ducha entre otros. Los filtros de osmosis inversa se instalan en cocina y baño para permitir la limpieza del agua lluvia, adicional a los filtros se usa el purificador de ozono en la cocina, complementando el sistema para purificar y tener un agua libre de bacterias y 100 % apta para el consumo. El costo de estos elementos es aproximadamente de \$ 485.900 por los 2 filtros y \$ 106.990 del ozonificador teniendo un total de \$ 592.890 COP

Figura 36. Filtros 4 etapas osmosis inversa + Purificador de agua



Nota: Izquierda filtro de agua de ósmosis inversa de 4 etapas, tomado de www.grival.com.

Derecha ozonificador de agua, tomado de www.ozonolux.com

Se recomienda pagar la instalación que ofrecen las empresas, y por lo tanto la mano de obra y herramienta aumenta la inversión inicial. El mantenimiento se recomienda hacerlo anual.

Tabla 54. Resumen costos potabilización escenario 3

Costos potabilización Escenario 3	
Costo und/m ²	
Materiales	directo
Filtro grival 4 etapas osmosis inversa x 2 und	\$ 485.900
Ozonificador agua ozononolux x 1 und	\$ 106.990
única inversión	\$ 592.890

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Tabla 55. Resumen costos mantenimiento potabilización escenario 3

Costos mantenimiento potabilización Escenario 3	
Costo und/m ²	
Materiales	Indirecto
Mantenimiento filtros x2 semestral	\$ 115.000
Mantenimiento ozonificador mensual	\$ 25.000
anual	\$ 140.000

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

10. Análisis de viabilidad financiera

10.1. Estudio financiero para la factibilidad del proyecto

Con el fin de demostrar la factibilidad del proyecto en términos financieros, la inversión será justificada en la Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Presente Neto (VPN). Considerando así tres (3) escenarios, para cada uno de estos se realizará análisis de viabilidad comparando la TIR con la TIO (tasa Interna de Oportunidad) e identificando un VPN mayor a cero (0).

El estudio se realizó en 2023 con tarifas vigentes del año, incluyendo costos y gastos operacionales entre los que está la mano de obra, cotizados en el 2023. Para el estudio financiero se consideró un IPC anual (Índices Precios al Consumidor) del 3 % anual sobre los costos y gastos.

10.2. Proyección

Escenario 1

En el primer escenario el ciclo de vida estimado para los tanques de almacenamiento de agua lluvia es de 35 años, pero el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto fue planteado a 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 12.004.760 COP.

Tabla 56. Inversión inicial escenario 1

inversión inicial - escenario 1	
	Costo und/m ²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 6.743.600
purificación	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 12.004.760

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Tabla 57. Rentabilidad escenario 1

flujo de caja proyectado periodo (año)	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m ³		\$ 1.961.989,65	\$ 2.020.849,34	\$ 2.081.474,82
inversión en activos fijos	\$ 12.004.760,00			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 12.004.760,00	\$ 1.961.989,65	\$ 2.020.849,34	\$ 2.081.474,82
TIR		17%		
TIO		12%		
VPN	\$ 3.590.118,62			

4	5	6	7	8	9
\$ 2.143.919,07	\$ 2.208.236,64	\$ 2.274.483,74	\$ 2.342.718,25	\$ 2.412.999,80	\$ 2.485.389,79
\$ 2.143.919,07	\$ 2.208.236,64	\$ 2.274.483,74	\$ 2.342.718,25	\$ 2.412.999,80	\$ 2.485.389,79

10	11	12	13	14	15
	ingresos				
\$ 2.559.951,48	\$ 2.636.750,03	\$ 2.715.852,53	\$ 2.797.328,11	\$ 2.881.247,95	\$ 2.967.685,39
\$ 2.559.951,48	\$ 2.636.750,03	\$ 2.715.852,53	\$ 2.797.328,11	\$ 2.881.247,95	\$ 2.967.685,39

Nota: Escenario 1. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 17 %, superando la tasa impuesta de los inversionistas del 12 %. Esto significa que es atractivo y puede aceptarse la inversión.

Se obtuvo un VPN de \$ 3.590.118 COP un valor evidente para afirmar que la inversión del proyecto puede aceptarse. Dado que el valor es positivo mayor a cero lo que significa ganar la TIO + el Valor positivo del resultado.

Escenario 2

En el segundo escenario el ciclo de vida estimado para los tanques de almacenamiento de agua lluvia sigue siendo de 35 años, pero el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto fue planteado a 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 8.094.860 COP.

Tabla 58. Inversión inicial escenario 2

inversión inicial - escenario 2	
	Costo und/m ²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 3.371.800
purificación	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 8.632.960

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Tabla 59. Rentabilidad escenario 2

flujo de caja proyectado	0	1	2	3
	ingresos			
ahorro en costo x m ³		\$ 1.271.724,85	\$ 1.309.876,60	\$ 1.349.172,89
inversión en activos fijos	\$ 8.632.960,00			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 8.632.960,00	\$ 1.271.724,85	\$ 1.309.876,60	\$ 1.349.172,89
TIR	15%			
TIO	12%			
VPN	\$ 1.475.347,49			

4	5	6	7	8	9
\$ 1.389.648,08	\$ 1.431.337,52	\$ 1.474.277,65	\$ 1.518.505,98	\$ 1.564.061,16	\$ 1.610.982,99
\$ 1.389.648,08	\$ 1.431.337,52	\$ 1.474.277,65	\$ 1.518.505,98	\$ 1.564.061,16	\$ 1.610.982,99

10	11	12	13	14	15
ingresos					
\$ 1.659.312,48	\$ 1.709.091,86	\$ 1.760.364,61	\$ 1.813.175,55	\$ 1.867.570,82	\$ 1.923.597,94
\$ 1.659.312,48	\$ 1.709.091,86	\$ 1.760.364,61	\$ 1.813.175,55	\$ 1.867.570,82	\$ 1.923.597,94

Nota: Escenario 2. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 15 %, superando la tasa impuesta de los inversionistas del 12 %. Esto significa que es atractivo y puede aceptarse la inversión.

Se obtuvo un VPN de \$ 1.475.347 COP un valor evidente para afirmar que la inversión del proyecto puede aceptarse. Dado que el valor es positivo mayor a cero lo que significa ganar la TIO + el Valor positivo del resultado.

Escenario 3

En el tercer escenario el ciclo de vida estimado para los tanques de almacenamiento de agua lluvia sigue siendo de 35 años, pero el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto fue planteado a 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 1.863.990 COP.

Tabla 60. Inversión inicial escenario 3

inversión inicial - escenario 3	
	Costo und/m ²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 1.104.800
purificación	\$ 592.890
única inversión	\$ 1.863.990

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Tabla 61. Rentabilidad escenario 3

flujo de caja proyectado	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m ³		\$ 296.947,16	\$ 305.855,58	\$ 315.031,25
inversión en activos fijos	\$ 1.863.990,10			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 1.863.990,10	\$ 296.947,16	\$ 305.855,58	\$ 315.031,25
TIR	16%			
TIO	12%			
VPN	\$ 496.295,02			

4	5	6	7	8	9
\$ 324.482,18	\$ 334.216,65	\$ 344.243,15	\$ 354.570,44	\$ 365.207,56	\$ 376.163,78
\$ 324.482,18	\$ 334.216,65	\$ 344.243,15	\$ 354.570,44	\$ 365.207,56	\$ 376.163,78

10	11	12	13	14	15
Ingresos					
\$ 387.448,70	\$ 399.072,16	\$ 411.044,32	\$ 423.375,65	\$ 436.076,92	\$ 449.159,23
\$ 387.448,70	\$ 399.072,16	\$ 411.044,32	\$ 423.375,65	\$ 436.076,92	\$ 449.159,23

Nota: Escenario 3. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 16 %, superando la tasa impuesta de los inversionistas del 12 %. Esto significa que es atractivo y puede aceptarse la inversión.

Se obtuvo un VPN de \$ 496.295 COP un valor evidente para afirmar que la inversión del proyecto puede aceptarse. Dado que el valor es positivo mayor a cero lo que significa ganar la TIO + el Valor positivo del resultado.

11. Resultados

11.1. Captación de agua e impacto en el consumo de agua potable desde fuentes públicas

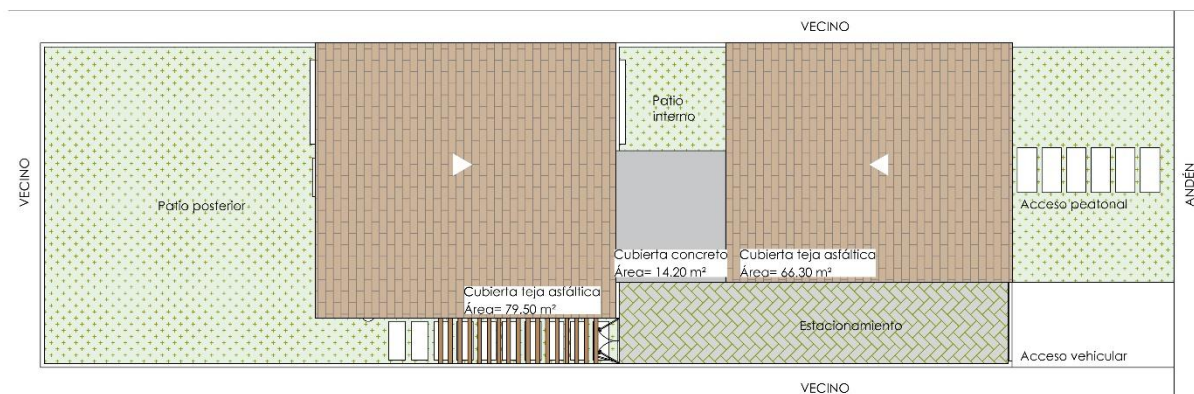
El caso de estudio cuenta con dos cubiertas inclinadas de teja asfáltica de 79.50 m² y 66.30 m², el agua recogida por estas cubiertas llega a una losa en concreto de 14.20 m² inclinada al 2 % hacia el estacionamiento. Las 3 cubiertas suman un total de 160 m² capaces de recolectar en la ciudad de Santiago de Cali 237.344 mm o l/m². Estas superficies aplican para los 3 escenarios planteados.

Figura 37. Modelo 3D caso de estudio



Nota: SketchUp. Elaboración propia (2023)

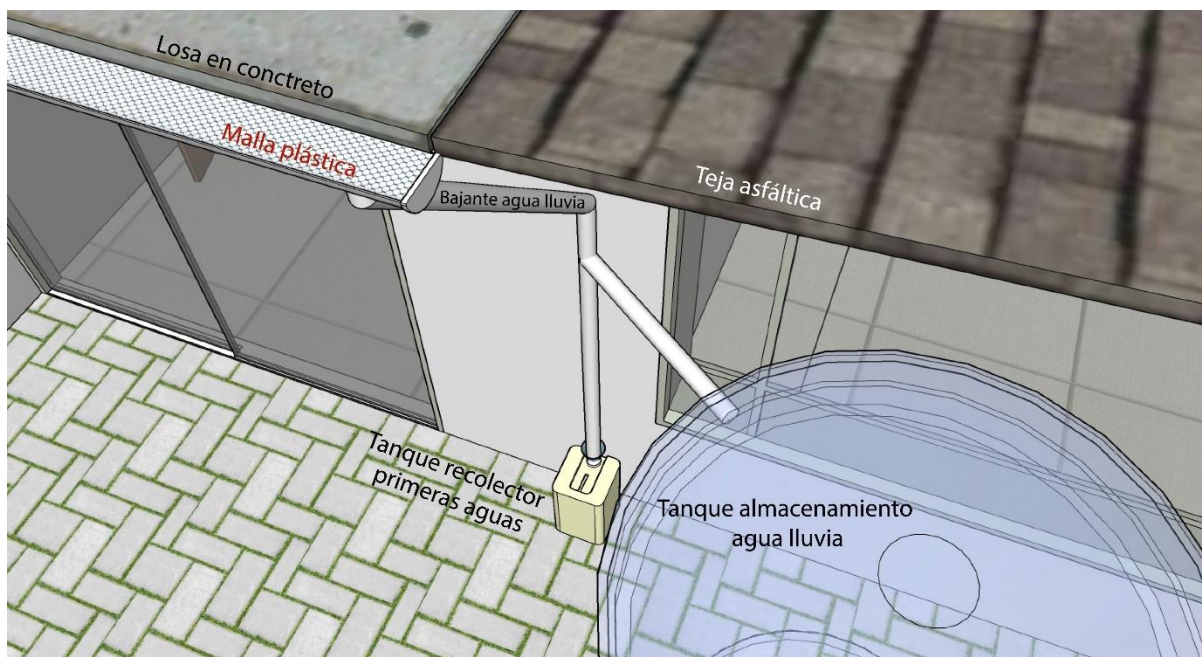
Figura 38. Planta de cubiertas caso de estudio



Nota: AutoCAD, Elaboración propia (2023)

Cuenta con 2 vigas canal para recoger el agua que llega de las cubiertas inclinadas y el agua que se recoge de la losa es a través de una canaleta PVC, en todos los casos se instala la malla plástica para evitar que residuos gruesos lleguen al primer tanque, los bajantes se unen para cosechar toda esa agua y depositarla primero en el tanque de separación.

Figura 39. Sistema recolección agua lluvia en caso de estudio



Nota: SketchUp. Elaboración propia (2023)

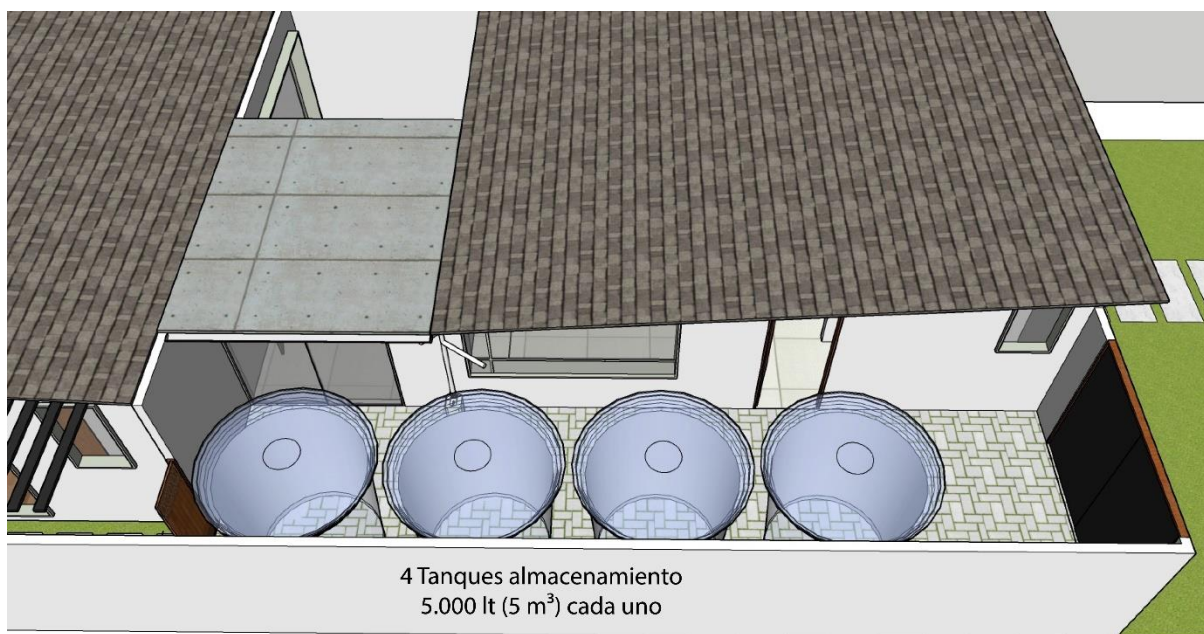
Cubierta, canaletas con malla plástica, bajantes y tanque de recolección de primeras aguas aplican en los 3 escenarios debido a que la oferta de agua lluvia será la misma en los 3 casos.

11.2. Diseño del sistema rentable de almacenamiento de agua lluvia

Escenario 1

En el primer escenario se presentan los tanques comerciales que se pueden conseguir en ferreterías, correspondientes a 4 unidades de 5 m³. Inicialmente se ubican en seguida del bajante y del tanque de primeras aguas, eso es en el estacionamiento de la vivienda. Debido a que el tamaño de cada tanque es tan grande logra ocupar todo el estacionamiento y se pierde el espacio

Figura 40. Sistema almacenamiento agua lluvia en caso de estudio escenario 1



Nota: Escenario 1, tanques en estacionamiento. Elaboración propia (2023)

La siguiente opción es ubicarlos en el patio posterior liberando el estacionamiento, este caso de estudio permite organizar los tanques de manera lineal para no perder mucho espacio.

Figura 41. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 1



Nota: Escenario 1, tanques en patio posterior. Elaboración propia (2023)

Opción 1 del escenario 1:

Existen otros tipos de tanques que se podrían acomodar de otra manera para lograr que la casa no pierda tanto espacio, estos son tanques IBC (Intermediate Bulk Container) de 1 m³ cuadrados con un costo equivalente al anterior \$ 352.900 COP cada uno y permiten ser apilados.

Figura 42. Tanque IBC cuadrado



Nota: Tanques IBC de 1 m³. Tomado de Homecenter.com

Aplicando los mismos conceptos de los tanques circulares, los costos directos para la compra de los tanques cuadrados se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero se propone tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 62. Resumen costos tanques IBC escenario 1

Costos tanques IBC Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie IBC (1m ³) x 20 und	\$ 7.058.000
única inversión	\$ 7.058.000

Nota: Opción 1 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 3.405.100 cada año por 20 tanques de 1 m³.

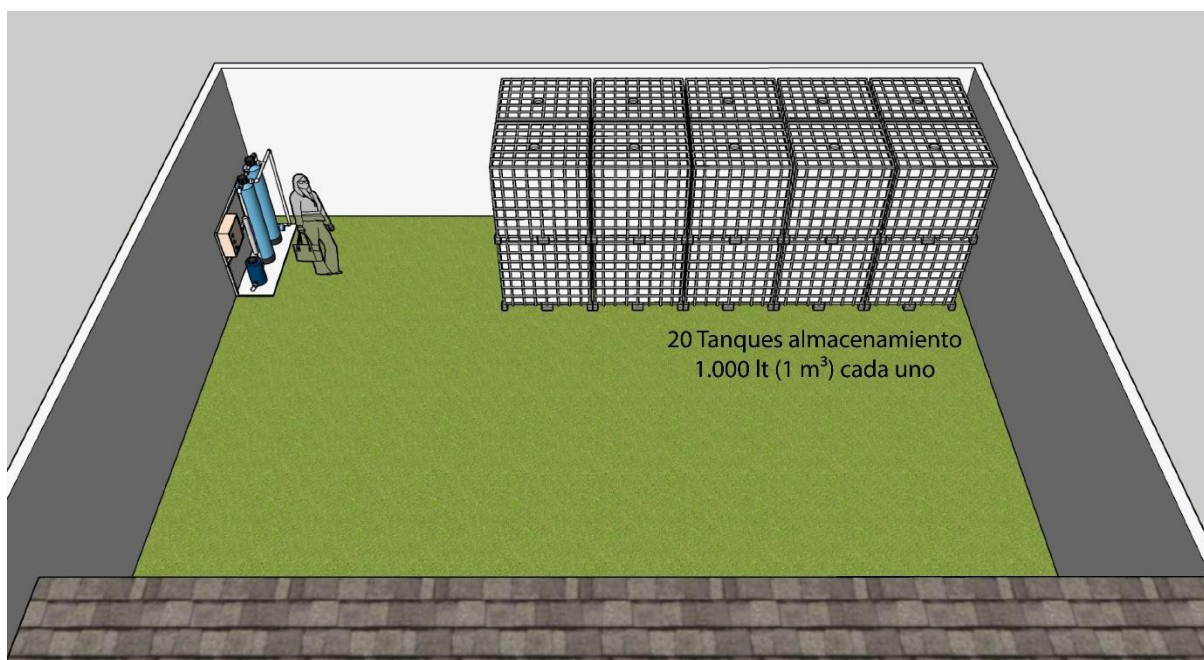
Tabla 63. Resumen costos mantenimiento tanques IBC escenario 1

Costos mantenimiento tanques Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque IBC (1m ³) x 20 und	\$ 3.405.100
anual	\$ 3.405.100

Nota: Opción 1 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Estos tanques se ubican en el patio posterior porque en el estacionamiento ocupa espacio del vehículo y obstruye la entrada de luz por las ventanas, estos tanques se apilan de manera lineal para no perder mucho espacio.

Figura 43. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques IBC caso de estudio escenario 1



Nota: Opción 1 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

En esta variación del primer escenario mantenemos el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto en 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 12.319.160 COP.

Tabla 64. Inversión inicial tanques IBC escenario 1

inversión inicial - escenario 1	
Costo und/m ²	
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 7.058.000
purificación	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 12.319.160

Nota: Opción 1 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Tabla 65. Rentabilidad tanques IBC escenario 1

flujo de caja proyectado periodo (año)	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m ³		\$ 1.951.722,00	\$ 2.010.273,66	\$ 2.070.581,87
inversión en activos fijos	\$ 12.319.160,00			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 12.319.160,00	\$ 1.951.722,00	\$ 2.010.273,66	\$ 2.070.581,87
TIR		16%		
TIO		12%		
VPN	\$ 3.194.106,15			

4	5	6	7	8	9
\$ 2.132.699,32	\$ 2.196.680,30	\$ 2.262.580,71	\$ 2.330.458,13	\$ 2.400.371,88	\$ 2.472.383,03
\$ 2.132.699,32	\$ 2.196.680,30	\$ 2.262.580,71	\$ 2.330.458,13	\$ 2.400.371,88	\$ 2.472.383,03

10	11	12	13	14	15
	ingresos				
\$ 2.546.554,52	\$ 2.622.951,16	\$ 2.701.639,69	\$ 2.782.688,89	\$ 2.866.169,55	\$ 2.952.154,64
\$ 2.546.554,52	\$ 2.622.951,16	\$ 2.701.639,69	\$ 2.782.688,89	\$ 2.866.169,55	\$ 2.952.154,64

Nota: Opción 1 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 16 %, superando la tasa impuesta de los inversionistas del 12 %. Esto significa que es atractivo y puede aceptarse la inversión.

Se obtuvo un VPN de \$ 3.194.106 COP un valor evidente para afirmar que la inversión del proyecto puede aceptarse. Dado que el valor es positivo mayor a cero lo que significa ganar la TIO + el Valor positivo del resultado.

Opción 2 del escenario 1:

Otra opción es fabricar un tanque en sitio, con concreto reforzado que cuente con una escotilla para su limpieza, en este caso las medidas serían 3,2 ancho x 3,2 largo x 1,9 alto, para un total de 19,46 m³, con un costo aproximado de \$ 20.240.023 COP. Este tanque se ubica en el patio posterior o también puede quedar en el estacionamiento sin afectar el espacio del vehículo.

Aplicando los mismos conceptos de los tanques circulares, los costos directos para construir los tanques subterráneos se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero se proponer tener únicamente el tanque posterior a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 66. Resumen costos tanque concreto escenario 1

Costos tanque concreto Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de concreto 1 (19,46m ³)	\$ 20.240.023
única inversión	\$ 20.240.023

Nota: Opción 2 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

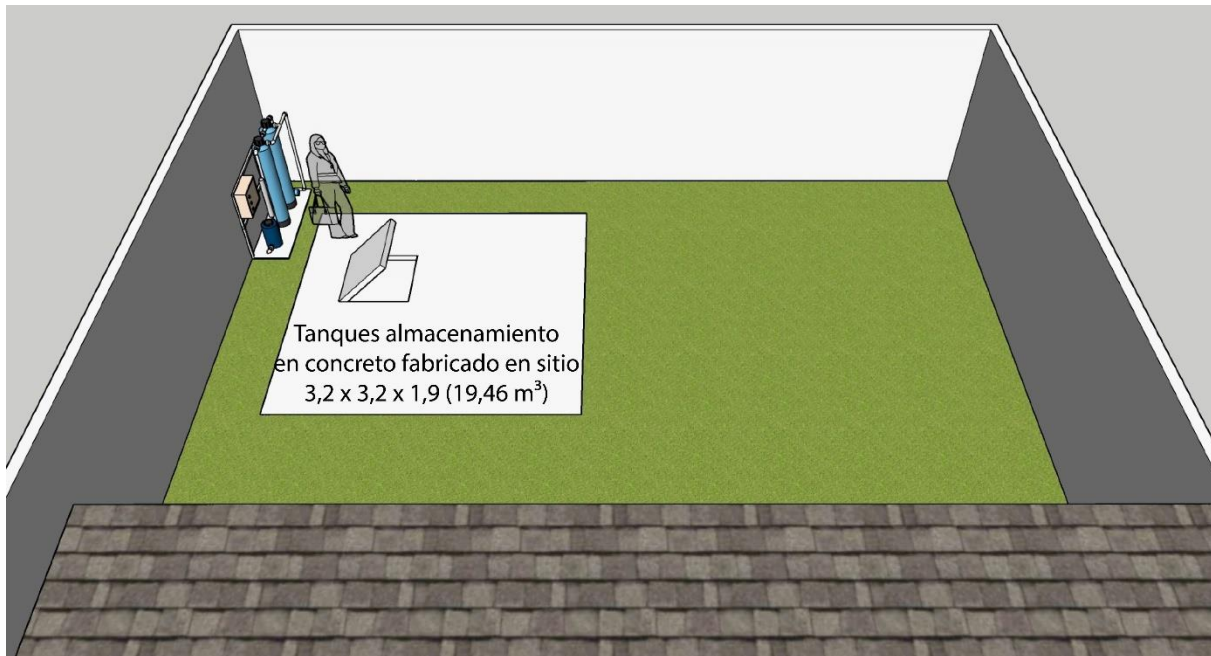
Los costos indirectos son para el mantenimiento del tanque la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 1.424.000 cada año.

Tabla 67. Resumen costos mantenimiento tanques concreto escenario 1

Costos mantenimiento tanques Escenario 1	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque concreto 19,46 m ³	\$ 1.424.000
anual	\$ 1.424.000

Nota: Opción 2 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Figura 44. Sistema almacenamiento agua lluvia tanque concreto escenario 1



Nota: Opción 2 - Escenario 1. Patio posterior. Elaboración propia (2023)

En esta segunda variación del primer escenario mantenemos el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto en 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 25.501.183 COP.

Tabla 68. Inversión inicial tanque concreto escenario 1

inversión inicial - escenario 1	
	Costo und/m²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 20.240.023
purificación	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 25.501.183

Nota: Opción 2 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

Tabla 69. Rentabilidad tanque concreto escenario 1

flujo de caja proyectado periodo (año)	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m³		\$ 1.960.328,65	\$ 2.019.138,51	\$ 2.079.712,67
inversión en activos fijos	\$ 25.501.183,45			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 25.501.183,45	\$ 1.960.328,65	\$ 2.019.138,51	\$ 2.079.712,67
TIR		4%		
TIO		12%		
VPN	-\$ 9.919.507,27			

4	5	6	7	8	9
\$ 2.142.104,05	\$ 2.206.367,17	\$ 2.272.558,19	\$ 2.340.734,93	\$ 2.410.956,98	\$ 2.483.285,69
\$ 2.142.104,05	\$ 2.206.367,17	\$ 2.272.558,19	\$ 2.340.734,93	\$ 2.410.956,98	\$ 2.483.285,69

10	11	12	13	14	15
\$ 2.557.784,26	\$ 2.634.517,79	\$ 2.713.553,32	\$ 2.794.959,92	\$ 2.878.808,72	\$ 2.965.172,98
\$ 2.557.784,26	\$ 2.634.517,79	\$ 2.713.553,32	\$ 2.794.959,92	\$ 2.878.808,72	\$ 2.965.172,98

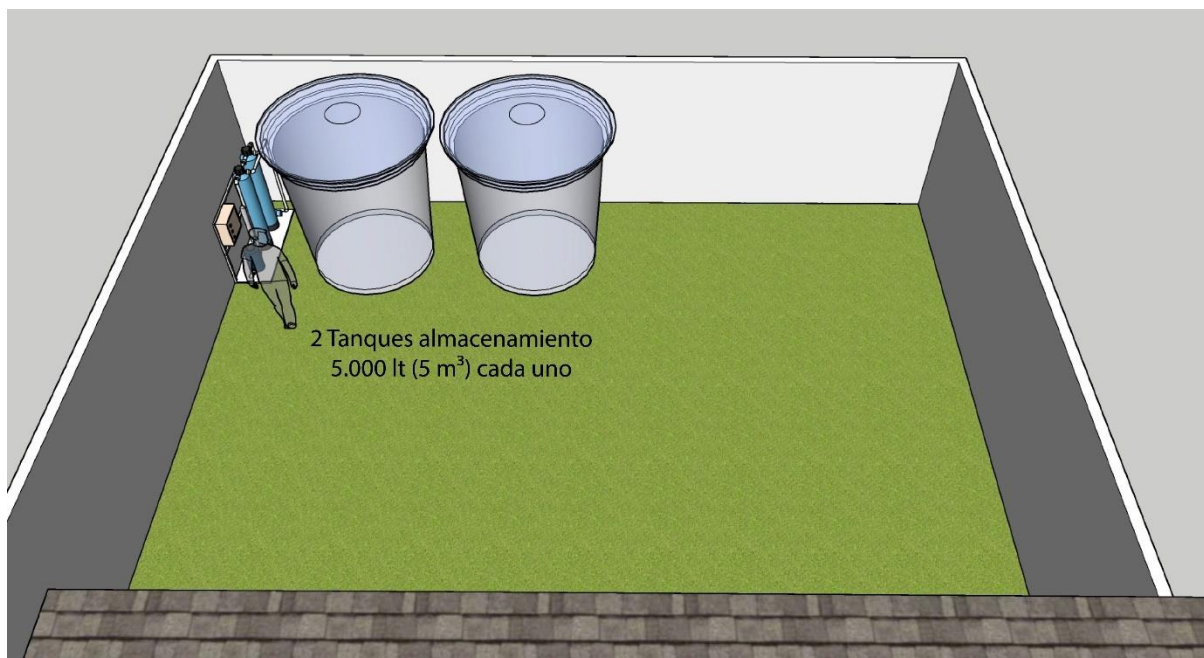
Nota: Opción 2 - Escenario 1. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 4 %, se evidencia que la TIR es menor a la tasa interna de oportunidad (TIO) lo que significa que no sería atractivo para un cliente que desee una tasa interna del 12 %. Sin embargo, los beneficios que podría tener esta opción es que arquitectónicamente no hay pérdida de espacio, es de fácil acceso y puede tener diferentes medidas que se adapten a los espacios de la vivienda.

Escenario 2

En el segundo escenario se muestran los tanques comerciales que se pueden conseguir en ferreterías, correspondientes a 2 unidades de 5 m³. igual al anterior escenario, el tamaño de los 2 tanques es tan grande que ocupan todo el estacionamiento y se pierde el espacio, por lo cual se los ubica en el patio posterior.

Figura 45. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 2



Nota: Escenario 2, tanques en patio posterior. Elaboración propia (2023)

Opción 1 del escenario 2:

Aplicando los mismos conceptos de los tanques circulares, los costos directos para la compra de los tanques cuadrados se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero se propone tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 70. Resumen costos tanques IBC escenario 2

Costos tanques IBC Escenario 2	
	Costo und/m²
Materiales	directo
Tanque de superficie IBC (1m³) x 10 und	\$ 3.529.000
única inversión	\$ 3.529.000

Nota: Opción 1 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 1.702.550 cada año para 10 tanques de 1 m³.

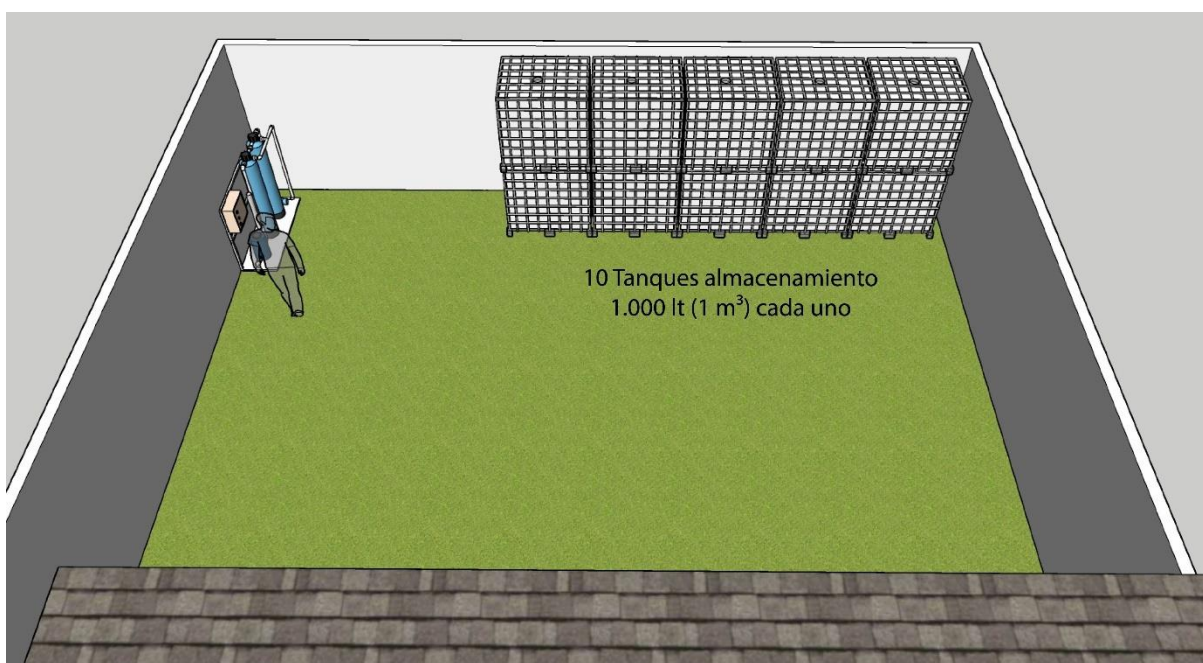
Tabla 71. Resumen costos mantenimiento tanques IBC escenario 2

Costos mantenimiento tanques IBC Escenario 2	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque IBC (1m ³) x 10 und	\$ 1.702.550
anual	\$ 1.702.550

Nota: Opción 1 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Estos tanques se ubican en el patio posterior porque en el estacionamiento ocupa espacio del vehículo y obstruye la entrada de luz por las ventanas, estos tanques se apilan de manera lineal para no perder mucho espacio.

Figura 46. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques IBC caso de estudio escenario 2



Nota: Opción 1 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

En esta variación del segundo escenario mantenemos el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto en 15 años, para esto, todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 8.790.160 COP.

Tabla 72. Inversión inicial tanques IBC escenario 2

inversión inicial - escenario 2	
	Costo und/m²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 3.529.000
purificación	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 8.790.160

Nota: Opción 1 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Tabla 73. Rentabilidad tanques IBC escenario 2

flujo de caja proyectado	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m³		\$ 1.261.744,47	\$ 1.299.596,80	\$ 1.338.584,71
inversión en activos fijos	\$ 8.790.160,00			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 8.790.160,00	\$ 1.261.744,47	\$ 1.299.596,80	\$ 1.338.584,71
TIR		14%		
TIO		12%		
VPN	\$ 1.238.818,39			

4	5	6	7	8	9
\$ 1.378.742,25	\$ 1.420.104,51	\$ 1.462.707,65	\$ 1.506.588,88	\$ 1.551.786,54	\$ 1.598.340,14
\$ 1.378.742,25	\$ 1.420.104,51	\$ 1.462.707,65	\$ 1.506.588,88	\$ 1.551.786,54	\$ 1.598.340,14

10	11	12	13	14	15
	ingresos				
\$ 1.646.290,35	\$ 1.695.679,06	\$ 1.746.549,43	\$ 1.798.945,91	\$ 1.852.914,29	\$ 1.908.501,72
\$ 1.646.290,35	\$ 1.695.679,06	\$ 1.746.549,43	\$ 1.798.945,91	\$ 1.852.914,29	\$ 1.908.501,72

Nota: Opción 1 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 14 %, superando la tasa impuesta de los inversionistas del 12 %. Esto significa que es atractivo y puede aceptarse la inversión.

Se obtuvo un VPN de \$ 1.238.818 COP un valor evidente para afirmar que la inversión del proyecto puede aceptarse. Dado que el valor es positivo mayor a cero lo que significa ganar la TIO + el Valor positivo del resultado.

Opción 2 del escenario 2:

Otra opción es fabricar un tanque en sitio, con concreto reforzado que cuente con una escotilla para si limpieza, en este caso las medidas serían 2,3 ancho x 2,3 largo x 1,9 alto, para un total de 10,05 m³, con un costo equivalente a \$ 14.119.699 COP. Aplicando las fórmulas de la viabilidad económica. Este tanque se ubica en el patio posterior o también puede quedar en el estacionamiento sin afectar el espacio del vehículo.

Aplicando los mismos conceptos de los tanques circulares, los costos directos para construir los tanques subterráneos se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero se proponer tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 74. Resumen costos tanque concreto escenario 2

Costos tanques ajustado Escenario 2	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de concreto 1 (10,05m ³)	\$ 14.119.699
única inversión	\$ 14.119.699

Nota: Opción 2 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 712.000 cada año.

Tabla 75. Resumen costos mantenimiento tanque concreto escenario 2

Costos mantenimiento tanques Escenario 2	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque concreto 10,05 m ³	\$ 712.000
anual	\$ 712.000

Nota: Opción 2 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Figura 47. Sistema almacenamiento agua lluvia tanque concreto escenario 2



Nota: Opción 2 - Escenario 2. Parqueaderos. Elaboración propia (2023)

Figura 48. Sistema almacenamiento agua lluvia tanque concreto escenario 2



Nota: Opción 2 - Escenario 2. Patio posterior. Elaboración propia (2023)

En esta segunda variación del segundo escenario mantenemos el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto en 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 19.380.859 COP.

Tabla 76. Inversión inicial tanque concreto escenario 2

inversión inicial - escenario 2	
	Costo und/m²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 14.119.699
purificación	\$ 5.094.860
única inversión	\$ 19.380.859

Nota: Opción 2 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

Tabla 77. Rentabilidad tanque concreto escenario 2

flujo de caja proyectado	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m ³		\$ 1.270.110,33	\$ 1.308.213,64	\$ 1.347.460,04
inversión en activos fijos	\$ 19.380.859,44			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 19.380.859,44	\$ 1.270.110,33	\$ 1.308.213,64	\$ 1.347.460,04
TIR		2%		
TIO		12%		
VPN	-\$ 9.285.385,00			

4	5	6	7	8	9
\$ 1.387.883,85	\$ 1.429.520,36	\$ 1.472.405,97	\$ 1.516.578,15	\$ 1.562.075,50	\$ 1.608.937,76
\$ 1.387.883,85	\$ 1.429.520,36	\$ 1.472.405,97	\$ 1.516.578,15	\$ 1.562.075,50	\$ 1.608.937,76

10	11	12	13	14	15
\$ 1.657.205,89	\$ 1.706.922,07	\$ 1.758.129,73	\$ 1.810.873,62	\$ 1.865.199,83	\$ 1.921.155,83
\$ 1.657.205,89	\$ 1.706.922,07	\$ 1.758.129,73	\$ 1.810.873,62	\$ 1.865.199,83	\$ 1.921.155,83

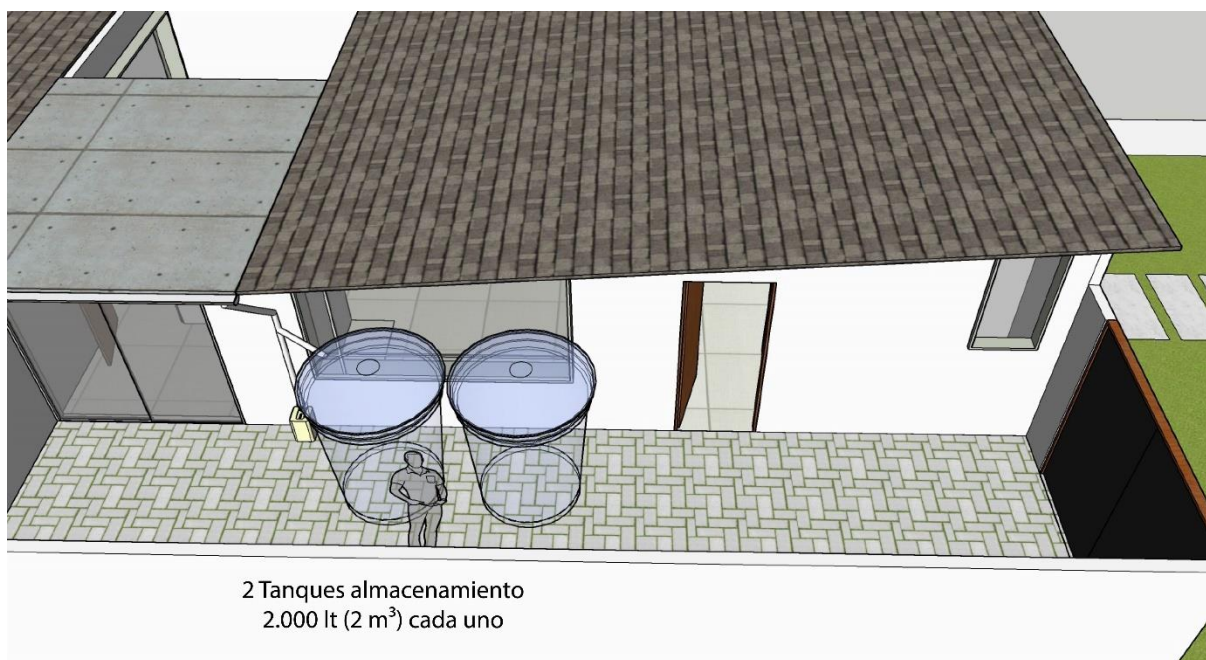
Nota: Opción 2 - Escenario 2. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 2 %, se evidencia que la TIR es menor a la tasa interna de oportunidad (TIO) lo que significa que no sería atractivo para un cliente que desee una tasa interna del 12 %. Sin embargo, los beneficios que podría tener esta opción es que arquitectónicamente no hay pérdida de espacio, es de fácil acceso y puede tener diferentes medidas que se adapten a los espacios de la vivienda.

Escenario 3

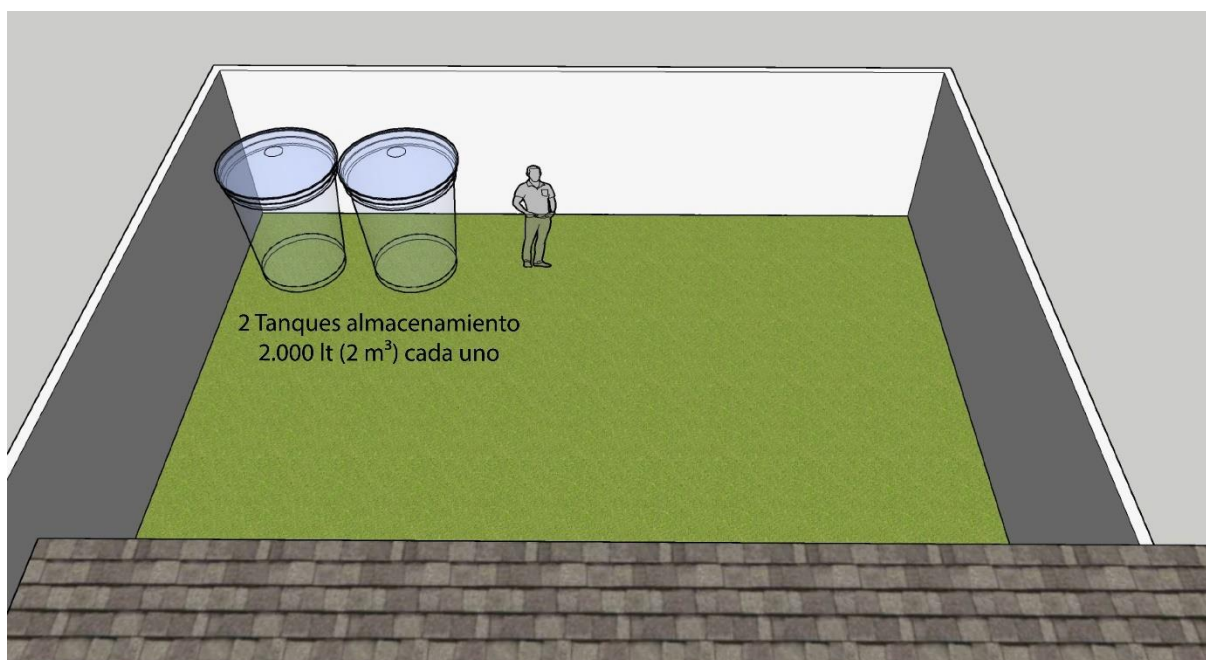
En el tercer escenario también cuenta con tanques comerciales que se pueden conseguir en ferreterías, correspondientes a 2 unidades de 2 m³. Aunque se puede ubicar en seguida del bajante y del tanque de primeras aguas en el estacionamiento de la vivienda, se ubica en el patio posterior para no perder el espacio del estacionamiento ni circulaciones de la vivienda.

Figura 49. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 3



Nota: Escenario 2, tanques en parqueadero. Elaboración propia (2023)

Figura 50. Sistema almacenamiento agua lluvia caso de estudio escenario 3



Nota: Escenario 2, tanques en patio posterior. Elaboración propia (2023)

Opción 1 del escenario 3:

Aplicando los mismos conceptos de los tanques circulares, los costos directos para la compra de los tanques cuadrados se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero se proponer tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 78. Resumen costos tanques IBC escenario 3

Costos tanques IBC Escenario 3	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie IBC (1m ³) x 4 und	\$ 1.411.600
única inversión	\$ 1.411.600

Nota: Opción 1 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 681.020cada año para 4 tanques de 1 m³.

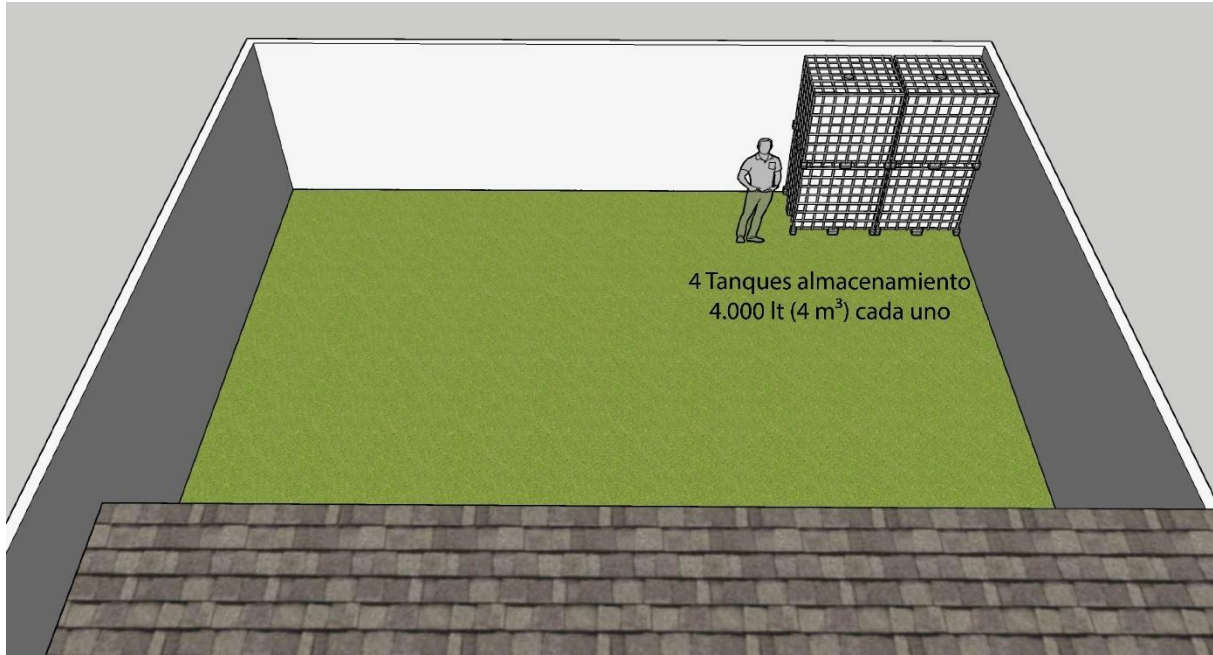
Tabla 79. Resumen costos mantenimiento tanques IBC escenario 3

Costos mantenimiento tanques IBC Escenario 3	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque IBC (1m ³) x 4 und	\$ 681.020
anual	\$ 681.020

Nota: Opción 1 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Estos tanques se ubican en el patio posterior porque en el estacionamiento ocupa espacio de la circulación y obstruye la entrada de luz por las ventanas, estos tanques se apilan de manera lineal para no perder mucho espacio.

*Figura 51. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques IBC caso de estudio
escenario 3*



Nota: Opción 1 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

En esta variación del tercer escenario mantenemos el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto en 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 2.170.790 COP.

Tabla 80. Inversión inicial tanque IBC escenario 3

inversión inicial - escenario 3	
	Costo und/m²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 1.411.600
purificación	\$ 592.890
única inversión	\$ 2.170.790

Nota: Opción 1 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Tabla 81. Rentabilidad tanque IBC escenario 3 (2023)

flujo de caja proyectado	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m ³		\$ 295.594,29	\$ 304.462,11	\$ 313.595,98
inversión en activos fijos	\$ 2.170.790,10			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 2.170.790,10	\$ 295.594,29	\$ 304.462,11	\$ 313.595,98
TIR		13%		
TIO		12%		
VPN	\$ 178.741,66			

4	5	6	7	8	9
\$ 323.003,86	\$ 332.693,97	\$ 342.674,79	\$ 352.955,04	\$ 363.543,69	\$ 374.450,00
\$ 323.003,86	\$ 332.693,97	\$ 342.674,79	\$ 352.955,04	\$ 363.543,69	\$ 374.450,00

10	11	12	13	14	15
			ingresos		
\$ 385.683,50	\$ 397.254,00	\$ 409.171,62	\$ 421.446,77	\$ 434.090,17	\$ 447.112,88
\$ 385.683,50	\$ 397.254,00	\$ 409.171,62	\$ 421.446,77	\$ 434.090,17	\$ 447.112,88

Nota: Opción 1 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 13 %, superando la tasa impuesta de los inversionistas del 12 %. Esto significa que es atractivo y puede aceptarse la inversión.

Se obtuvo un VPN de \$ 178.741 COP un valor evidente para afirmar que la inversión del proyecto puede aceptarse. Dado que el valor es positivo mayor a cero lo que significa ganar la TIO + el Valor positivo del resultado.

Opción 2 del escenario 3:

Finalmente, fabricar un tanque en concreto de 3,63 m³ no es eficiente en el sentido que tiene una inversión inicial muy alta y el mantenimiento no es fácil debido a su pequeño tamaño aproximado de 1,6 ancho x 1,6 largo x 1,5 alto, en este caso se opta por usar varios tanques de 220 litros (0.22 m³) con estructuras en madera o metálicas que los soporten uno sobre otro, al unirlos

suman un total de 3,52 m³, con un costo equivalente a \$ 2.606.240 COP. Este tanque se ubica en el patio posterior.

Aplicando los mismos conceptos de los tanques circulares, los costos directos para la compra y montaje de los tanques se relacionan en la siguiente tabla, lo ideal es tener un tanque previo a la potabilización y otro posterior, pero se proponer tener únicamente los tanques posteriores a la potabilización reduciendo el costo inicial a la mitad.

Tabla 82. Resumen costos tanques superficiales escenario 3

Costos tanques superficiales Escenario 3	
	Costo und/m ²
Materiales	directo
Tanque de superficie 1 (0,22m ³) x 16 und	\$ 2.606.240
única inversión	\$ 2.606.240

Nota: Opción 2 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

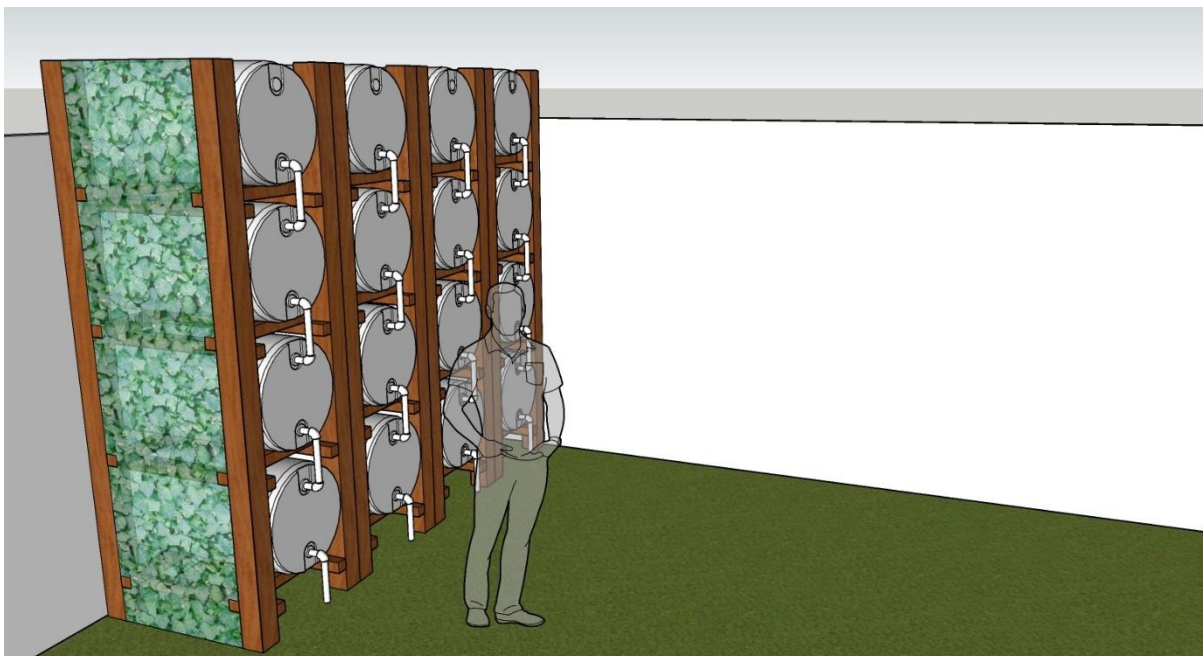
Los costos indirectos son para el mantenimiento de los tanques la cuál debe realizarse por empresas especializadas en limpieza \$ 964.752 cada año para 16 tanques de 0.22 m³.

Tabla 83. Resumen costos mantenimiento tanques superficiales escenario 3 (

Costos mantenimiento tanques Escenario 3	
	Costo und/m ²
Materiales	Indirecto
Mantenimiento tanque (0,22m ³) x 16 und	\$ 964.752
anual	\$ 964.752

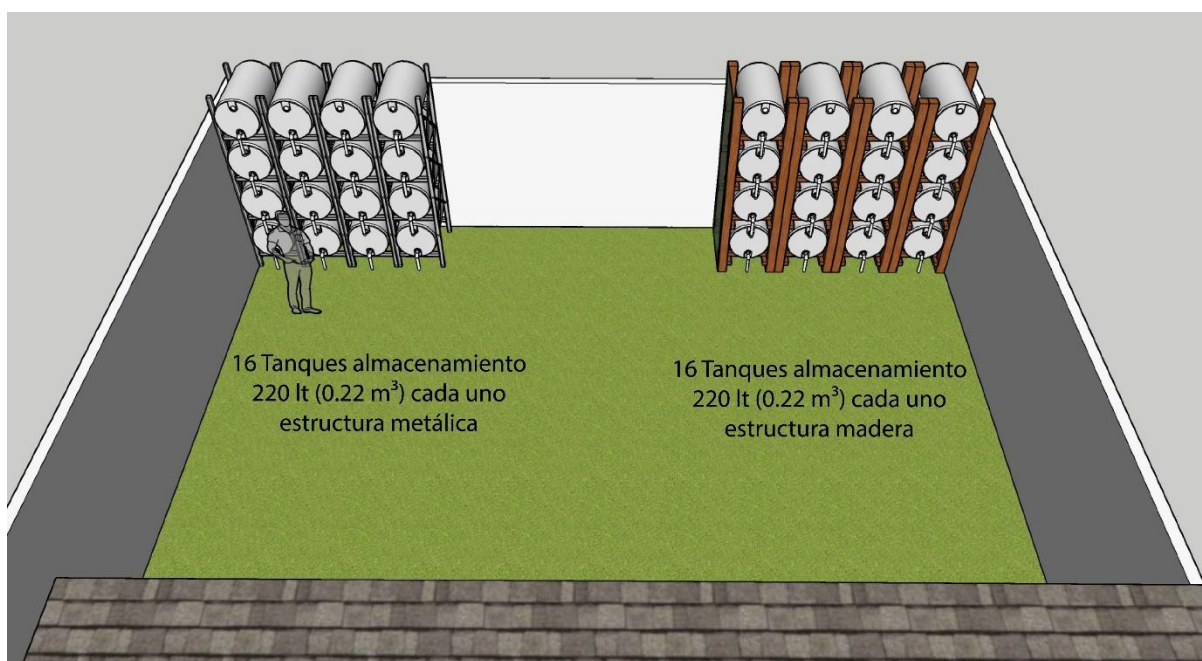
Nota: Opción 2 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Figura 52. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques 220 L escenario 3



Nota: Opción 2 - Escenario 3. Patio posterior. Elaboración propia (2023)

Figura 53. Sistema almacenamiento agua lluvia tanques 220 L escenario 3



Nota: Opción 2 - Escenario 3. Patio posterior. Elaboración propia (2023)

En esta segunda variación del tercer escenario mantenemos el horizonte de tiempo de rentabilidad del proyecto en 15 años, para esto todos los costos y gastos del proyecto están representados en años, se espera que en este periodo de tiempo se pueda evidenciar el retorno de capital invertido y la obtención de beneficios significativos. la inversión inicial es de \$ 3.365.430 COP.

Tabla 84. Inversión inicial escenario 3

inversión inicial - escenario 3	
	Costo und/m ²
material	directo
recolección	\$ 166.300
almacenamiento	\$ 2.606.240
purificación	\$ 592.890
única inversión	\$ 3.365.430

Nota: Opción 2 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

Tabla 85. Rentabilidad tanque superficiales escenario 3

flujo de caja proyectado	0	1	2	3
		ingresos		
ahorro en costo x m ³		\$ 293.197,98	\$ 301.993,92	\$ 311.053,74
inversión en activos fijos	\$ 3.365.430,10			
flujo de caja neto del proyecto	-\$ 3.365.430,10	\$ 293.197,98	\$ 301.993,92	\$ 311.053,74
TIR		6%		
TIO		12%		
VPN	-\$ 1.034.945,39			

4	5	6	7	8	9
\$ 320.385,35	\$ 329.996,91	\$ 339.896,81	\$ 350.093,72	\$ 360.596,53	\$ 371.414,43
\$ 320.385,35	\$ 329.996,91	\$ 339.896,81	\$ 350.093,72	\$ 360.596,53	\$ 371.414,43

10	11	12	13	14	15
\$ 382.556,86	\$ 394.033,57	\$ 405.854,57	\$ 418.030,21	\$ 430.571,12	\$ 443.488,25
\$ 382.556,86	\$ 394.033,57	\$ 405.854,57	\$ 418.030,21	\$ 430.571,12	\$ 443.488,25

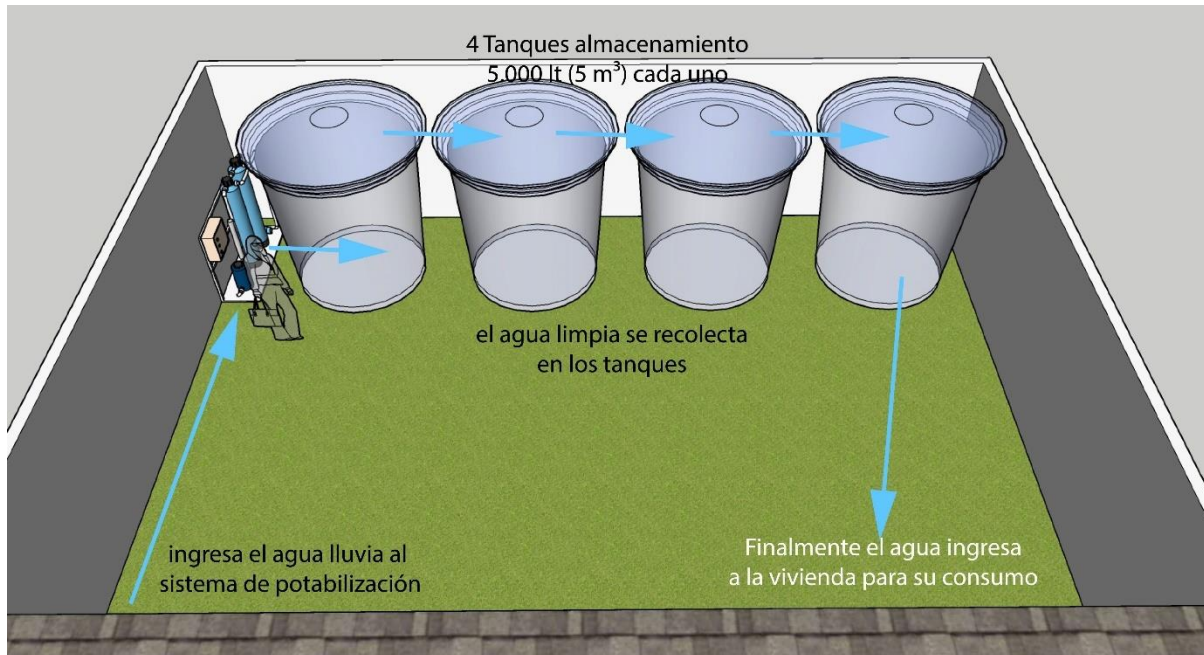
Nota: Opción 2 - Escenario 3. Elaboración propia (2023)

De acuerdo con las condiciones expuestas en la tabla anterior se identifica una TIR del 6 %, se evidencia que la TIR es menor a la tasa interna de oportunidad (TIO) lo que significa que no sería atractivo para un cliente que desee una tasa interna del 12 %.

Escenario 1 y 2

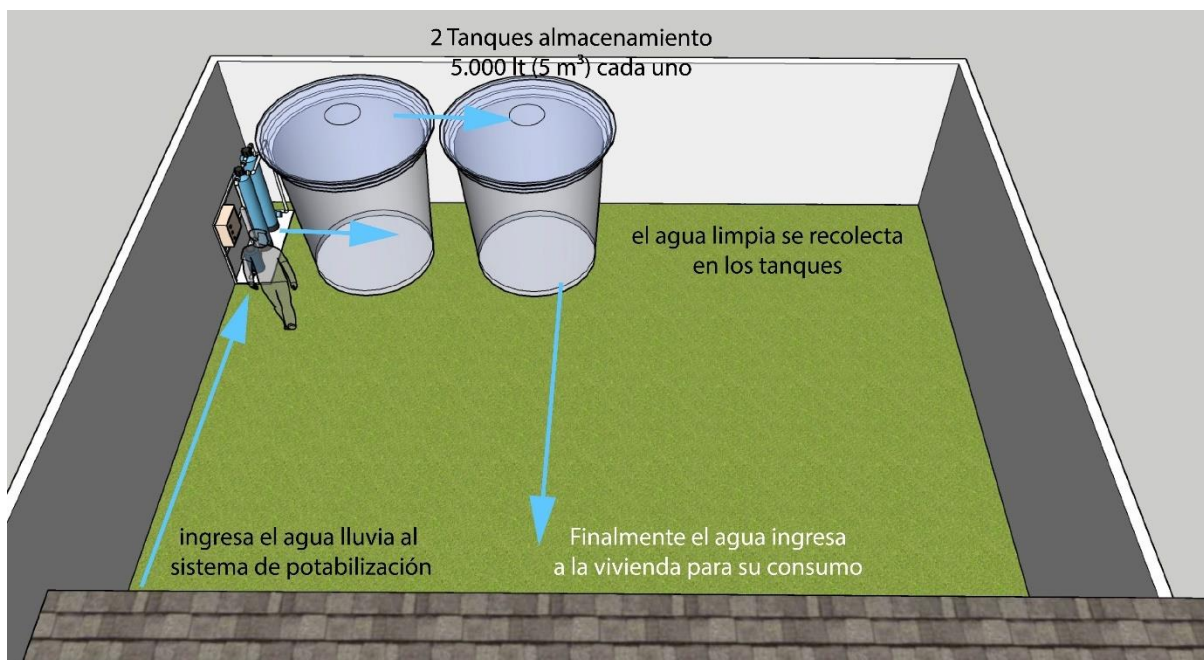
Dentro de los escenarios 1 y 2, el caso de estudio cuenta con un KIT Planta de Tratamiento de Agua Lluvia Completo listo para conectar, el caudal de agua es de 1 a 2 m³ al día, suficientes para soportar la demanda de la vivienda con 3 integrantes. Este será instalado en el patio, antes de los tanques de recolección.

Figura 54. Sistema purificación agua lluvia caso de estudio escenario 1



Nota: Escenario 1, potabilización y circulación del agua en patio posterior. Elaboración propia (2023)

Figura 55. Sistema purificación agua lluvia caso de estudio escenario 2

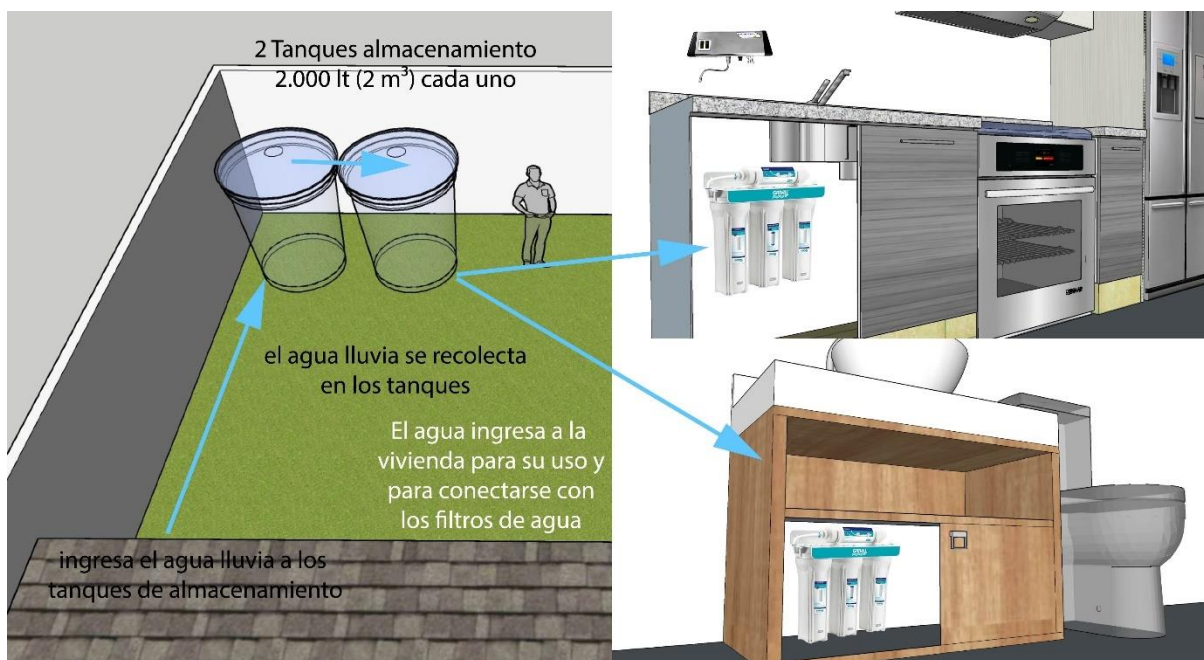


Nota: Escenario 2, potabilización y circulación del agua en patio posterior. Elaboración propia (2023)

Escenario 3

Mientras que para el escenario 3, se usan filtros de agua 4 etapas instalados bajo el mesón de la cocina y baño, y un ozonificador en la cocina para complementar la potabilización del agua lluvia que permite beber el agua totalmente potable.

Figura 56. Sistema purificación agua lluvia caso de estudio escenario 3



Nota: Escenario 3, potabilización y circulación del agua en patio posterior, cocina y baño.

Elaboración propia (2023)

12. Conclusiones

El uso del techo asfáltico y de concreto, permite que la vivienda pueda recolectar el 90% del agua que cae (factor de escurrimiento de 0.9), lo que representa que en el techo de 160 m² pueda recolectar 213.61 m³ de agua al año, por lo que aprovechar la captación de agua lluvia desde el techo de la vivienda, consiguió disminuir el consumo del agua potable desde la empresa de acueducto, por ende, reducir el costo en la factura del servicio público y cumplir con los programas del sector ambiental y desarrollo sostenible colombiano.

Tener el recolector de primeras aguas beneficia al sistema de almacenamiento y potabilización, ya que el agua que ingresa al tanque de almacenamiento es más limpia y, por lo tanto, no requiere de mantenimientos adicionales, además, no esfuerza el sistema de purificación ofreciendo más tiempo de vida útil a los filtros.

El aporte ecológico para la ciudad es que con materiales perdurables se ahorra agua, reduce la contaminación de las escurrimientos y, por lo tanto, cumple con la calidad de agua dentro y fuera de la vivienda debido a que el sistema reutiliza el agua lluvia.

El diseño de los tanques formulados tomadas de la Metodología de la Organización Panamericana de la Salud, resultaron óptimos y rentables en los tres escenarios planteados, dicho de otra manera, dependiendo del consumo que tenga la familia de 3 integrantes y de la cantidad de agua que pueda almacenar en los tanques, se determinó que en el escenario 1, donde la familia tiene el perfil tradicional que consume 230.19 m³ anuales, y con el tanque de 19.55 m³ pueden recolectar 234.60 m³ al año, superando la cantidad de agua que requiere este escenario, ahorrando aproximadamente \$ 1.453.000 COP al año, reducen el 100 % del consumo del agua potable y

tienen una ganancia de la TIR de \$ 3.590.118 COP anuales. En el caso del escenario 2, los 3 integrantes consumen aproximadamente 118.40 m³ es decir una reducción del 51.42 % del consumo de agua potable de la empresa de acueducto respecto al anterior escenario, ahorrando aproximadamente \$ 755.117 COP al año y con una rentabilidad de la TIR de \$ 1.475.347 COP anuales. Finalmente, en el tercer escenario, la familia tiene el perfil ahorrador, es decir que para cubrir sus necesidades diarias consumen 118.40 m³ y abastecen con los tanques de 3.63 m³, 43.60 m³ anuales, y requieren suplir 74.81 m³, a pesar de pagarle a la empresa de acueducto esos metros cúbicos de agua, es posible ahorrar aproximadamente \$ 282.780 COP y tener una ganancia económica de la TIR de \$ 496.295 COP al año.

El planteamiento de otras opciones diferentes a los tanques circulares tradicionales, en la opción 1 de los escenarios se reemplazan los tanques circulares por cuadrados IBC, aunque bajó la rentabilidad, en el primer escenario la TIR de 17 % a 16 % con una diferencia de \$ 396.012 COP de ganancia, en el segundo escenario la TIR de 15 % a 14 % o \$ 236.529 COP menos de ganancia por año, y en el tercer escenario la TIR de 16 % a 13 % o \$ 317.553 COP menos de ganancia, en los 3 casos se mejora el espacio interno de la vivienda y sigue siendo rentable por encima del 12 % mínimo para proyectos ambientales.

En la opción 2 de los escenarios, casos que comprende construir tanques en concreto bajo tierra, aunque trae ventajas arquitectónicas porque hay flexibilidad en los tamaños para construirlos, no se pierde espacio útil en la casa, la rentabilidad no es tan alta, se recupera a más de 30 años, prácticamente la vida útil de los elementos que componen el sistema de recolección. Para esta opción es más estético y un fin medio ambiental porque se reduce el impacto ecológico sobre las escorrentías, ahorro de agua potable, si hay ahorro económico, y se cumple con las

normas colombianas que piden el reúso del agua, aunque no hay un retorno del capital a corto o mediano plazo.

El debido uso de los sistemas de potabilización complementa el sistema básico de recolección de agua lluvia y permite el suministro constante de agua a la vivienda. Depende de la necesidad, es decir, de la cantidad de elementos que se abastecen en la vivienda, es en el escenario 1 y 2 que, con una Kit completo de potabilización listo para usar, se suple la necesidad de agua potable durante el año, y para el escenario 3 con filtros de 4 etapas y un ozonificador, garantizamos el consumo de agua potable en la vivienda. Es importante destacar que, para evitar daños en el sistema, se debe hacer un buen mantenimiento, su limpieza y reemplazo de filtros es muy importante para mantenerlos siempre en óptimas condiciones, estos mantenimientos tienen un costo anual de \$ 1.220.000 COP y \$ 140.000 respectivamente. En los 3 escenarios se cumplen las normas colombianas de control y calidad el agua para el consumo humano.

Teniendo en cuenta cada componente del sistema de recolección de agua lluvia, el uso de una cubierta asfáltica, implementar el sistema de recolección de primeras aguas, calcular para cada escenario el tanque óptimo y complementar con un sistema de purificación de agua, se concluye que un hogar estrato 4, integrado por 3 personas, puede implementar el sistema de recolección de agua lluvia, ahorrar agua potable proveniente de la empresa de acueducto y además obtener rentabilidad, cumple con las leyes colombianas y optimiza el uso del agua. Este sistema a su vez es un modelo de negocio práctico que, con previos análisis de cada región, puede ser implementado en cualquier parte de Colombia.

13. Lista de referencias

- Azabache Orellana, J. D. (2016). Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial y Comercial. In *Universidad ESAN*. Universidad ESAN.
<https://repositorio.esan.edu.pe//handle/20.500.12640/1813>
- Bandyopadhyay, N., Bhuiyan, C., & Saha, A. K. (2020). Drought mitigation: Critical analysis and proposal for a new drought policy with special reference to Gujarat (India). *Progress in Disaster Science*, 5, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100049>
- Betancourt Rojas, L. C., & Rodríguez Villalba, W. A. (2019). *Formulación del programa de ahorro y uso eficiente del agua en la Universidad Católica de Manizales*.
<http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/handle/10839/2498>
- Britto, A. L., Maiello, A., & Quintslr, S. (2019). Water supply system in the Rio de Janeiro Metropolitan Region: Open issues, contradictions, and challenges for water access in an emerging megacity. *Journal of Hydrology*, 573, 1007–1020.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.045>
- Burkhard, R., Deletic, A., & Craig, A. (2000). Techniques for water and wastewater management: a review of techniques and their integration in planning. *Urban Water*, 2(3), 197–221. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00056-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00056-X)
- Calvacehe Escobar, D. F., Obando Rodríguez, J. N., & Ortiz Lasso, J. S. (2019). Situación del aprovechamiento de aguas pluviales en Colombia. *Universidad Mariana*, 71–72.
<http://editorial.umariana.edu.co/revistas/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/2008/2063>
- Cano Ortega, A. (2019). *Formulación de estrategias de sostenibilidad ambiental para ser implementadas en proyectos de viviendas de interés social en el municipio de Santiago de*

Cali [Universidad Autónoma de Occidente].

<http://red.uao.edu.co/handle/10614/10734>

CCCS. (2019, December 10). *Programa LEED® en Colombia – Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS*. <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>

CCCS. (2021, September 26). *Programa LEED® en Colombia – Consejo Colombiano de Construcción Sostenible – CCCS*. <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>

Chávez Zambrano, A. V, Gonzalez Gonzales, J. F., Looz Cedeño, R. A., & López Palacios, K. G. (2020). EFICIENCIA HÍDRICA EN LA VIVIENDA. In *FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS* (Vol. 1).

https://www.researchgate.net/profile/Karen_Gema/publication/343323533_UNIVERSIDAD_TECNICA_DE_MANABI_FACULTAD_DE_Ciencias_MATEMATICAS_FISICAS_Y_QUIMICAS_ARTICULO_CIENTIFICO_TITULO_EFICIENCIA_HIDRICA_EN_LA_VIVIENDA_ASIGNATURA_DINAMICA_PARALELO_D_PROFESOR_GUDANE

DANE. (2018). *DANE - ¿Cómo vivimos?* Censo Nacional de Población y Vivienda 2018.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/como-vivimos>

de Macedo, M. B., do Lago, C. A. F., & Mendiondo, E. M. (2019). Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. *Science of The Total Environment*, 647, 923–931.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.002>

Dubois, R. (2018, September 7). *Ventajas de las tejas de fibrocemento vs las tejas*

termoacústicas. <https://www.etex.com.co/noticias/ventajas-de-las-tejas-de-fibroemento-vs-las-tejas-termoacusticas/>

- Farreny, R., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2011). Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighbourhoods. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.008>
- Fonseca, C. R., Hidalgo, V., Díaz-Delgado, C., Vilchis-Francés, A. Y., & Gallego, I. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145, 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.057>
- García, M. C., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. #36 *Revista de Ingeniería*, 60–64. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-49932012000100012&script=sci_abstract&tlng=pt
- Ghisi, E., & Ferreira, D. F. (2007). Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(7), 2512–2522. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.019>
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1), 26–42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.08.008>
- GOV.CO, P. único del estado colombiano. (2022). *¿Cuáles son las causales para que se presenten incrementos en las tarifas de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo? | Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.

<https://www.cra.gov.co/preguntas/cuales-son-las-causales-se-presenten-incrementos-las-tarifas-los-servicios-publicos-acueducto>

Granada Carvajal, L. (2011). *Estimación del consumo básico de agua potable en Colombia* [Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/3682>

Haque, M. M., Rahman, A., & Samali, B. (2016). Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production*, 137, 60–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.038>

Hargreaves, A. J., Farmani, R., Ward, S., & Butler, D. (2019). Modelling the future impacts of urban spatial planning on the viability of alternative water supply. *Water Research*, 162, 200–213. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.029>

Holcim. (2020). *¿Cuáles son las ventajas de poner tejas?*
<https://www.altamezcla.com.ar/notas/135/cuales-son-las-ventajas-de-poner-tejas>

Hugues, R. T. (2019). La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(2), 125–139.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382019000200125&lng=es&nrm=iso&tlng=es

IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022* (p. 466). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Marzo de 2019, Bogotá, D. C., Colombia.
<http://files/120/evaluacion-recurso-hidrico.html>

Jing, X., Zhang, S., Zhang, J., Wang, Y., & Wang, Y. (2017). Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 74–85.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>

Kabore, A., Savadogo, B., Rosillon, F., Traore, A. S., & Dianou, D. (2013).

Optimization of the effectiveness of the moringa oleifera seeds in the treatment of drinking water in sub-saharan africa: Case study of the waters of Burkina Faso. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 26(3), 209–220. <https://doi.org/10.7202/1018786ar>

Lade, O., Oloke, D., Lade, O., & Oloke, D. (2013). Assessment of Rainwater Harvesting Potential in Ibadan, Nigeria. *Environmental Engineering Research*, 18(2), 91–94. <https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.2.091>

Leong, J. Y. C., Oh, K. S., Poh, P. E., & Chong, M. N. (2017). Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3014–3027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.167>

Mavegsa. (2019). *Ventajas y Desventajas del Uso de Tejas Asfálticas*. Ventajas y Desventajas Del Uso de Tejas Asfálticas. <https://mavegsa.com/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-tejas-asfalticas/>

Mitchell, V. G., Taylor, A., Fletcher, T. D., & Deletic, A. (2005). *Storm water reuse-Potable water substitution for Melbourne: Vol. 05/12* (Issue ISWR Report).

Moreno Lozano, D. (2020). Metodología de dimensionamiento de un sistema de recolección de aguas lluvias con un mecanismo de separación de primer flujo variable. *Instname:Universidad de Los Andes*. <http://hdl.handle.net/1992/48919>

Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., Vieira, S. C., Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2019). El Niño/Southern Oscillation Modoki and its effects on the spatiotemporal variability of precipitation in Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 120–132. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.704>

- Njepu, A., Zhang, L., & Xia, X. (2019). Optimal tank sizing and operation of energy-water supply systems in residences. *Energy Procedia*, 159, 352–357.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.003>
- Okoye, C. O., Solyali, O., & Akintuğ, B. (2015). Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.015>
- OPS, COSUDE, & Unatsabar, C. (2004, September 26). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. Guía de diseño para captación del agua de lluvia. <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=30731&indexSearch=ID>
- Palla, A., Gnecco, I., & La Barbera, P. (2017). The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale. *Journal of Environmental Management*, 191, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.025>
- Peralta Mahecha, G., Alarcón García, S. J., Garzón Camacho, J. C., Neuta Niño, D. F., Rodríguez Arregocés, N. X., Peralta Mahecha, G., Alarcón García, S. J., Garzón Camacho, J. C., Neuta Niño, D. F., & Rodríguez Arregocés, N. X. (2021). Desabastecimiento hídrico en el sistema de ciudades de Colombia: ordenamiento ambiental y territorial en el Área Hidrográfica Magdalena-Cauca. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 459–480. <https://doi.org/10.15446/RCDG.V30N2.88753>
- Planeación Municipal, A. de S. de C., Escobar Morales, G., & Perilla Galvis, D. M. (2020). *Cali en cifras* (p. 220). <http://datos.cali.gov.co/dataset/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion-y-densidad-cali-1987-2020>
- Raúl Castro, R., Amado, D. A. C., & Yolanda Casallas, A. (2020). Discount rate: Relevant

- aspects for environmental normative in Colombia. *Desarrollo y Sociedad*, 2020(84), 9–55. <https://doi.org/10.13043/DYS.84.1>
- Reyes, M. C., & Rubio, J. J. (2014). Descripción De Los Sistemas De Recolección Y Aprovechamiento De Aguas Lluvias [Universidad Católica de Colombia - Facultad de Ingeniería Civil]. In 2014. <http://hdl.handle.net/10983/2089>
- Roebuck, R. M., Oltean-Dumbrava, C., & Tait, S. (2011). Whole life cost performance of domestic rainwater harvesting systems in the United Kingdom. *Water and Environment Journal*, 25(3), 355–365. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00230.x>
- Roibas, D., Garcia-Valiñas, M. A., & Fernandez-Llera, R. (2019). Measuring the Impact of Water Supply Interruptions on Household Welfare. *Environmental and Resource Economics*, 73(1), 159–179. <https://doi.org/10.1007/s10640-018-0255-7>
- Rozin, P., Haddad, B., Nemeroff, C., & Slovic, P. (2015). *Psychological aspects of the rejection of recycled water: Contamination, purification and disgust*. 14. <https://scholarsbank.uoregon.edu/xmlui/handle/1794/19440>
- Şahin, N. İ., & Manioğlu, G. (2019). Water conservation through rainwater harvesting using different building forms in different climatic regions. *Sustainable Cities and Society*, 44, 367–377. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.010>
- Sahin, O., Bertone, E., & Beal, C. D. (2017). A systems approach for assessing water conservation potential through demand-based water tariffs. *Journal of Cleaner Production*, 148, 773–784. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.051>
- Salazar Adams, A., & Pineda Pablos, N. (2010). Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México. *Región y Sociedad*, 22(49), 3–16. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1870-

39252010000300001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Sazakli, E., Alexopoulos, A., & Leotsinidis, M. (2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*, 41(9), 2039–2047.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.037>

Senevirathna, S., Ramzan, S., & Morgan, J. (2019). A sustainable and fully automated process to treat stored rainwater to meet drinking water quality guidelines. *Process Safety and Environmental Protection*, 130, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.005>

Shi, X., Tal, G., Hankins, N. P., & Gitis, V. (2014). Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 1, 121–138.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.04.003>

Słyś, D., & Stec, A. (2020). Centralized or Decentralized Rainwater Harvesting Systems: A Case Study. *Resources*, 9(1), 5. <https://doi.org/10.3390/resources9010005>

Solis Valencia, A. (2019). *Unidad de aprendizaje - Sistemas de Irrigación* (p. 34).

http://148.215.1.182/bitstream/handle/20.500.11799/108044/secme-11279_1.pdf?sequence=1

Susca, T. (2019). Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and Environment*, 162, 106273.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106273>

Tobías Ramírez, S. (2019). *Comparativa entre el sistema tradicional de captación pluvial y la combinación de la cosecha de lluvia con el techo escudo. Caso de estudio: Ciudad Juárez*. [Universidad Autónoma de Ciudad Juárez].

<http://erecursos.uacj.mx/handle/20.500.11961/5239>

Torres, J. J. B., & Nieto, L. A. R. (n.d.). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA*

*RECUPERADOR DE AGUAS LLUVIAS Y/O GRISES PARA USOS
DOMÉSTICOS DIFERENTES AL CONSUMO HUMANO.*

Ulacia Balmaseda, R. (2014). *Sismteas de Captación de Agua de Lluvia*. 41.

<http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero01.pdf>

Yajaira, D., & Herrera, A. (2019). *MONOGRAFÍA EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL DERECHO
AL AGUA EN COLOMBIA: RETOS Y PERSPECTIVAS*.

Zanni, S., Cipolla, S. S., Fusco, E. di, Lenci, A., Altobelli, M., Currado, A., Maglionico, M., &

Bonoli, A. (2019). Modeling for sustainability: Life cycle assessment application to
evaluate environmental performance of water recycling solutions at the dwelling level.

Sustainable Production and Consumption, 17, 47–61.

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.09.002>

Zdeb, M., Zamorska, J., Papciak, D., & Słyś, D. (2020). The Quality of Rainwater Collected
from Roofs and the Possibility of Its Economic Use. *Resources*, 9(2), 12.

<https://doi.org/10.3390/resources9020012>