Encontro Técnico
AESABESP
Congresso Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente

34ETC-06165
IMPLANTAÇÃO DE WETLANDS CONSTRUÍDAS NO ESTADO DE SÃO PAULO: ANÁLISE DE VIABILIDADE ECÔNOMICA

Luiz Guilherme Marques Jazbinsek
Prof. Dr. Rolando Gaal Vadas, Camila Farias Rodrigues, Vinicius Monteiro de Carvalho Back
luiz@galahad.eng.br

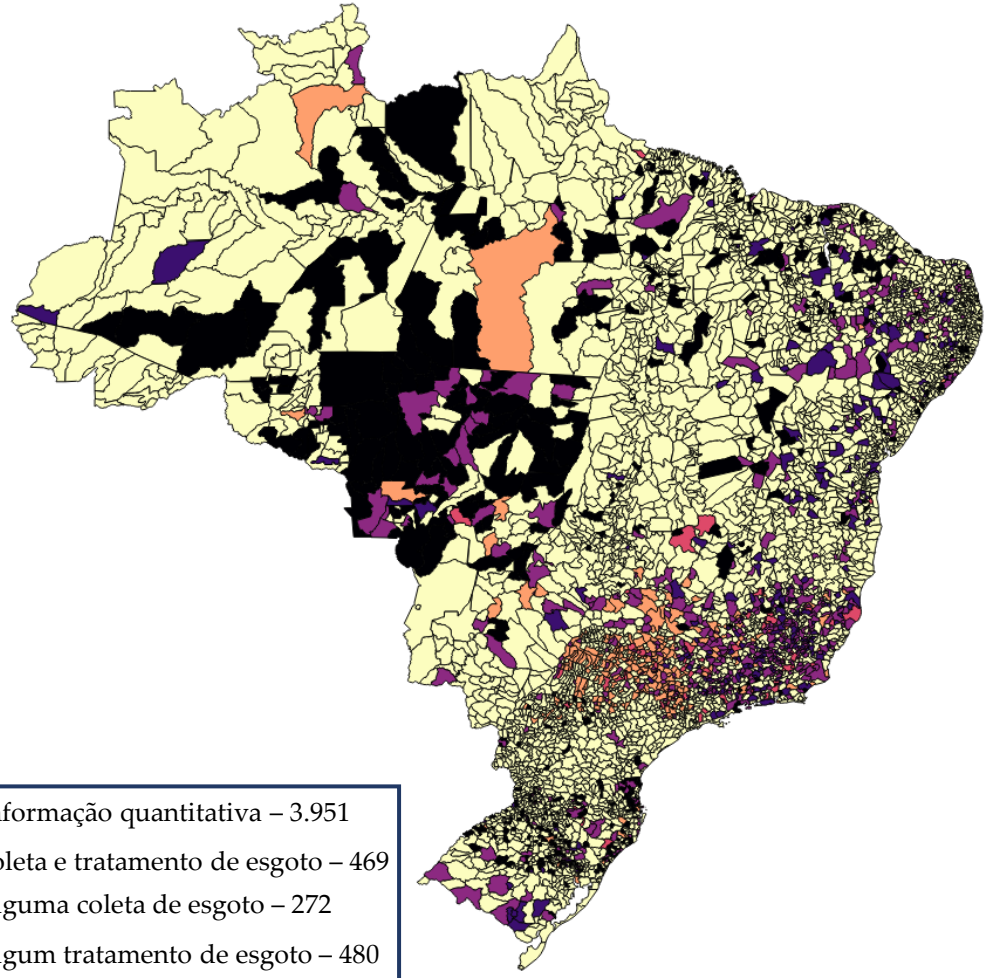
OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019

- Elaborado pelo Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR) disponibiliza informações similares às encontradas em CETESB (2020), porém em âmbito nacional.

- O consumo per capita de água típico em todos estados brasileiros e, nos municípios atendidos por companhias de saneamento básico, desenvolve critérios econômicos importantes, como faturamento típico por metro cúbico coletado e tratado - informações a serem consideradas no estudo de viabilidade para determinar prazos de retorno de investimento.

- Quanto ao tratamento dos esgotos, observa-se que o índice do país chega a 49,1% para a estimativa dos esgotos gerados e 78,5% para os esgotos que são coletados.



DAE (2019) – Análise Numérica

Encontro Técnico AESABESP
Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

- O "Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019" do Ministério de Desenvolvimento Regional levanta a situação de 30% da população do país e de 28% dos municípios. Julgamos a amostra como representativa e recente o suficiente para executarmos uma reflexão sobre o país.

- Os dados processado ao lado consideram somente as planilhas LEP, LPR e LPU fornecida pela SNIS. Os dados entregues por formulários simplificado foram descartados, visto as informações serem escassas.

- Dentre os municípios com coleta de esgoto, aqueles que concentram grandes populações possuem um tratamento total de esgoto elevado:
  - Municípios menores, no entanto, possuem índices progressivamente menores – apesar de serem estatisticamente mais representativos na amostra.

Brasil			
Pop. Município Superior a	Atendida por Esgoto	Não Atendida por Esgoto	Municípios
1.000.000	4.354.089	7.235.421	4
500.000	6.229.864	1.729.991	12
250.000	5.348.506	1.843.907	21
125.000	5.826.743	2.912.806	49
64.000	4.624.833	3.674.386	89
32.000	4.422.999	4.044.766	190
16.000	3.474.154	3.147.795	300
8.000	1.992.995	1.789.377	321
4.000	891.955	992.986	326
2.000	244.516	464.577	233
1.000	17.598	79.371	58
Total/Média	**37.428.252,00**	**27.915.383,00**	**1.603**

Brasil			
Pop. Município Superior a	Pop. Atendida por Esgoto	% Esgoto Tratado	Municípios
1.000.000	57%	79%	3
500.000	79%	80%	6
250.000	75%	61%	12
125.000	66%	70%	27
64.000	55%	61%	43
32.000	52%	57%	75
16.000	52%	41%	118
8.000	53%	39%	130
4.000	46%	35%	106
2.000	34%	35%	64
1.000	17%	32%	7
Total/Média	**53%**	**54%**	**591**

Fonte: Elaboração Própria com dados DAE (2019)

DAE (2019) vs IBGE (2010) Comparação

Encontro Técnico AESABESP
Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

Tratamento Esgoto vs População:

Municípios (2019)	Pop. Atendida por Esgoto	% Esgoto Tratado
até 10.000 hab.	40%	37%
de 10.000 a 20.000	52%	38%
de 20.001 a 50.000	53%	47%
de 50.001 a 100.000	53%	58%
de 100.001 a 200.000	59%	65%
acima de 200.000	74%	69%
Total	**55%**	**52%**

Fonte: Elaboração própria com dados DAE (2019)

Municípios (2010)	Quantidade	População Existente (Milhões)
até 10.000 hab.	2.525	12,95
de 10.000 a 20.000	1.402	19,75
de 20.001 a 50.000	1.031	30,92
de 50.001 a 100.000	330	22,72
de 100.001 a 200.000	145	19,56
acima de 200.000	132	83,58
Total	**5.565**	**189,47**

Fonte: IBGE (2010)

- Reestruturação dos dados do DAE, com população limitada, comparada aos dados IBOV.
- 89% dos municípios possuem até 50 mil habitantes, concentrando aqui 33,6% da população brasileira:
  - 1 a 50 mil hab.: 50,10 milhões não possuem tratamento
  - 50 mil a 200 mil: 27,79 milhões não possuem tratamento
  - Acima de 200 mil: 40,90 milhões não possuem tratamento
- A conjuntura nacional demanda soluções de saneamento viáveis para munícipios pouco populosos.

Wetlands Construídas - Conceitos

- Wetlands Construídas (WC):
  - Sistemas de tratamento de água com o objetivo de simular artificialmente os ecossistemas naturais de lagoas, geralmente representados por canais rasos.
  - Apresentam boa capacidade de filtração de impurezas, garantindo água de boa qualidade a custos operacionais e de implantação reduzidos.

- São também uma área de controle de erosão.

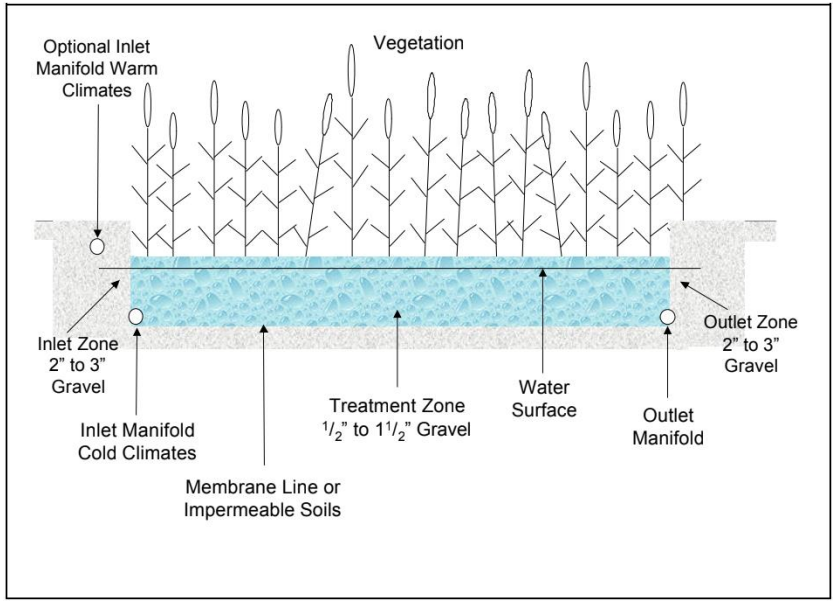
Wetland Construída de Fluxo Superficial – Tres Rios, Phoenix, Arizona



Fonte: City of Phoenix

- Comparando aos métodos tradicionais de saneamento, as wetlands demandam pouco esforço operacional, demandando somente manutenções trimestrais ou semestrais – porém historicamente demandam uma área superior às soluções de lagoas.

Composição Simplificada de uma Wetland Construída de Fluxo Subsuperficial



Fonte: EPA (2000)

Revisão da Literatura – EPA

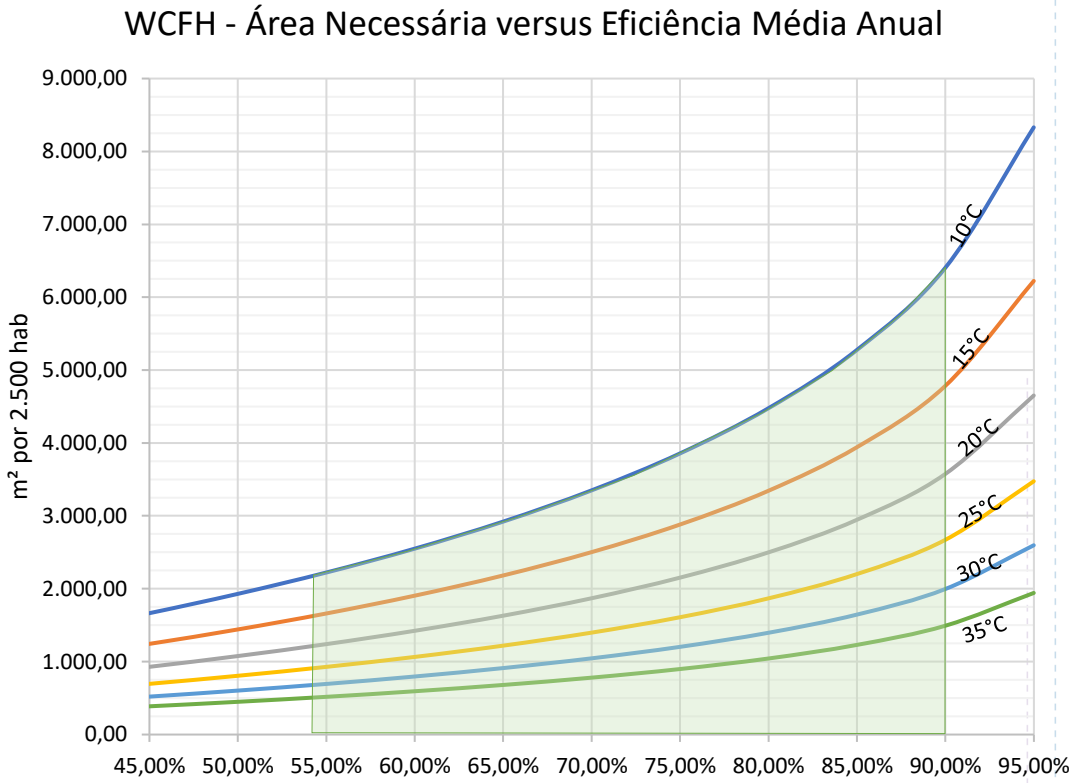
- O "Design Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater" fornecido pela Environmental Protection Agency (EPA) estipula que as wetlands construídas podem ser dimensionadas:

$$A_{WC} = \frac{Q_{med.} * \ ln(C_{afluente} * C_{efluente}{}^{-1})}{K_t \ * p_{rofundidade} * p_{orosidade}}$$

- Alternativamente:

$$Ef_{\%} = 1 - \frac{Cefl.}{Cafl.} = \left(e^{\frac{A_{WC} * K_t * p_{rof.} * p_{oros.}}{Q_{med.}}}\right)^{-1}$$

- A relação de eficiência das WC – e, por consequência, o tamanho necessário para atender uma população – está intimamente ligado à temperatura anual média a que o sistema está exposto. Logarítmico, a área construída para atender 2.500 pessoas entre um país temperado (média de 15°C) com um tropical (média de 30°C) pode variar em 150%.



Revisão da Literatura – UFABC

Encontro Técnico AESABESP
Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

- O "Manual de Sistemas de Wetlands Construídas para o Tratamento de Esgotos Sanitários: Implantação Operação e Manutenção" determina eficiência e equações de ajuste térmico para poluentes típicos:

$$K_t = K_{20} * \theta^{T-20}$$

Tipo de WC	Poluente	Remoção Média (%)
WCFS	P	85,0
	N	< 10,0
	DBO	31,0
	DQO	< 20,0
WCFH	P	51,5
	N	30,0
	DBO	81,5
	DQO	76,5
WCFV	P	60,0
	N	45,0
	DBO	59,0
	DQO	63,5

Constantes de Decaimento Térmico conforme Benassi et al.

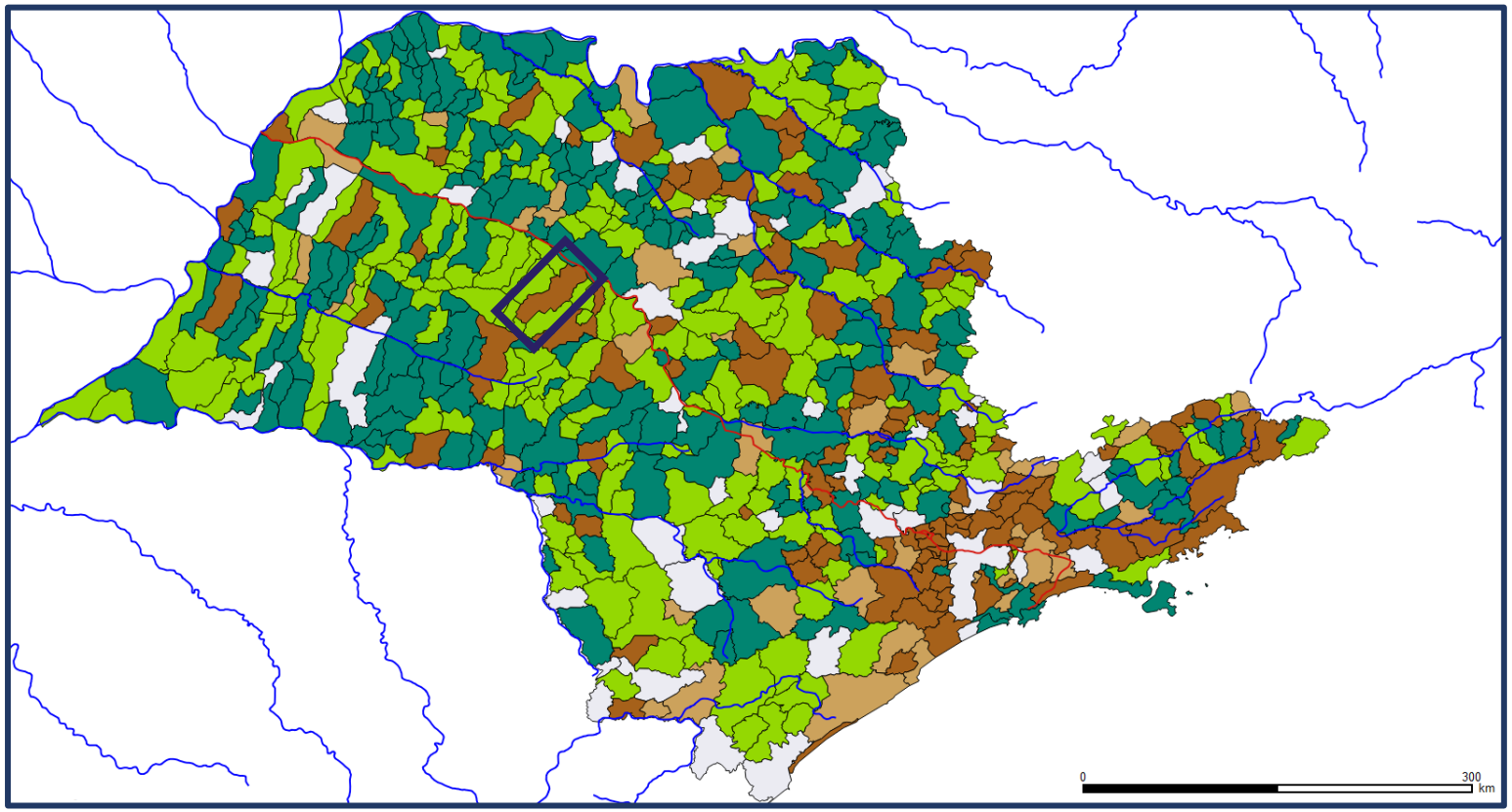
Tipo de WC	Poluente	Tempe-ratura (°C)	Constante de decaimento K_{20} (d^{-1})	Coeficiente de Temperatura
WCFS	$DBO_{5,20}$	20	0,678	1,06
	Nitrogênio Amoniacal (NH_4)		0,2187	1,048
	Nitrato (NO_3)		1,000	1,15
WCFSS	$DBO_{5,20}$		1,104	1,06
	Nitrogênio Amoniacal (NH_4)		0,2187	1,048
	Nitrato (NO_3)		1,000	1,15

Fonte: Kadlec; Wallace (2008); Wang *et al.* (2010); Crites *et al.* (2014)

Relatório CETESB (2020) – Overview

Encontro Técnico AESABESP
Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

Contribuição de Demanda Bioquímica de Oxigênio dos municípios do Estado de São Paulo, Pirajuí Destacado



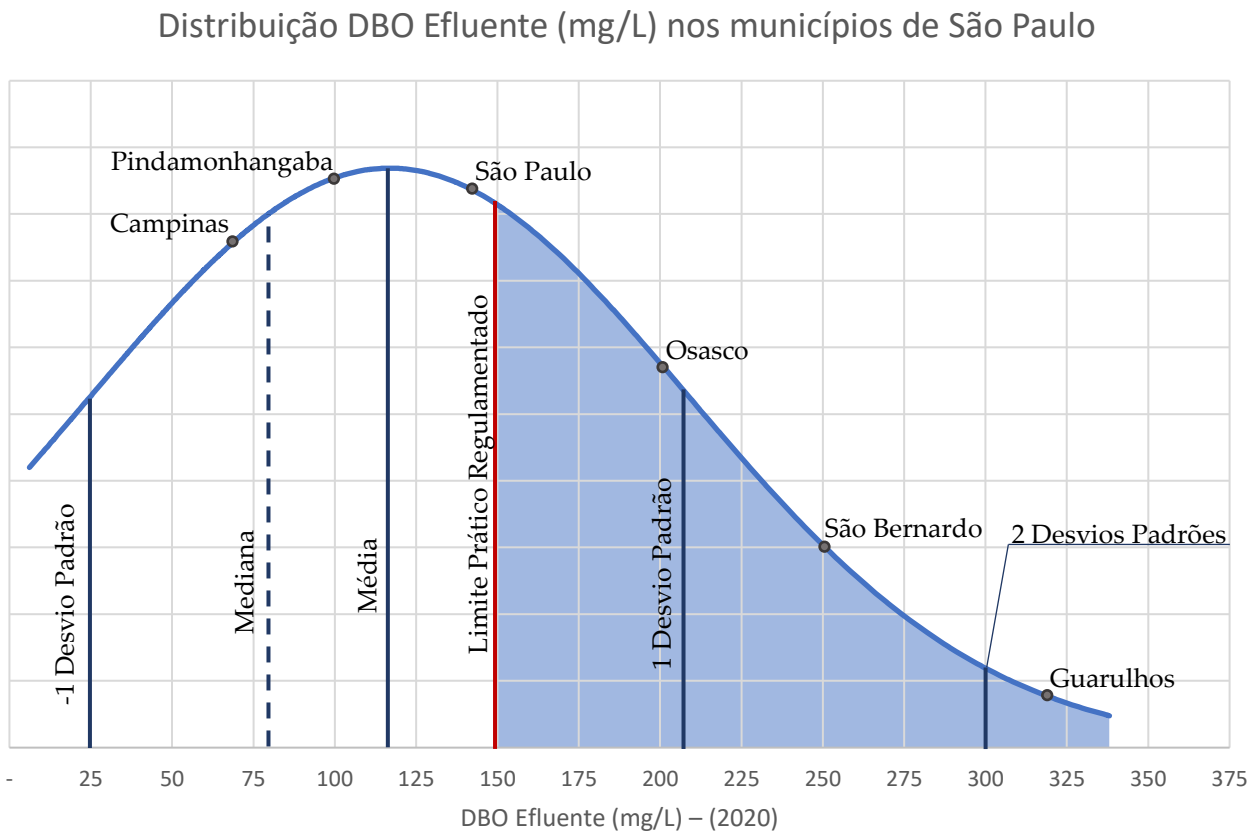
- Rio Tietê
- Cidades com DBO Efluente de até 60 mg/L
- Cidades com DBO Efluente de até 120 mg/L
- Cidades com DBO Efluente de até 150 mg/L
- Cidades com DBO Efluente de até 200 mg/L
- Cidades com DBO Efluente de até 400 mg/L

Fórmula Utilizada:

$$DBO_{5,20}^{Remanes.} = \frac{DBO_{dia}^{kg} * 10^6}{Pop. * Contrib.}$$

- Demanda Bioquímica de Oxigênio: quantidade de oxigênio necessária para a oxidação de material orgânico biodegradável em recursos hídricos..
- Parâmetro amplamente empregado para avaliar a poluição em águas – utilizado para estimar carga orgânica presente em recursos fluviais.
- Conforme CONAMA 430/2011:
  - Limite Efetivo para DBO:
    - 120 mg/L
  - Limite Máximo para DBO:
    - Superior a 120 mg/L para tratamento com eficiência mínima de 60% - aprox. 150 mg/L dos valores típicos de efluentes residenciais
    - Estudo de viabilidade de autodepuração no corpo hídrico

Relatório CETESB (2020) – Distribuição De Tratamento

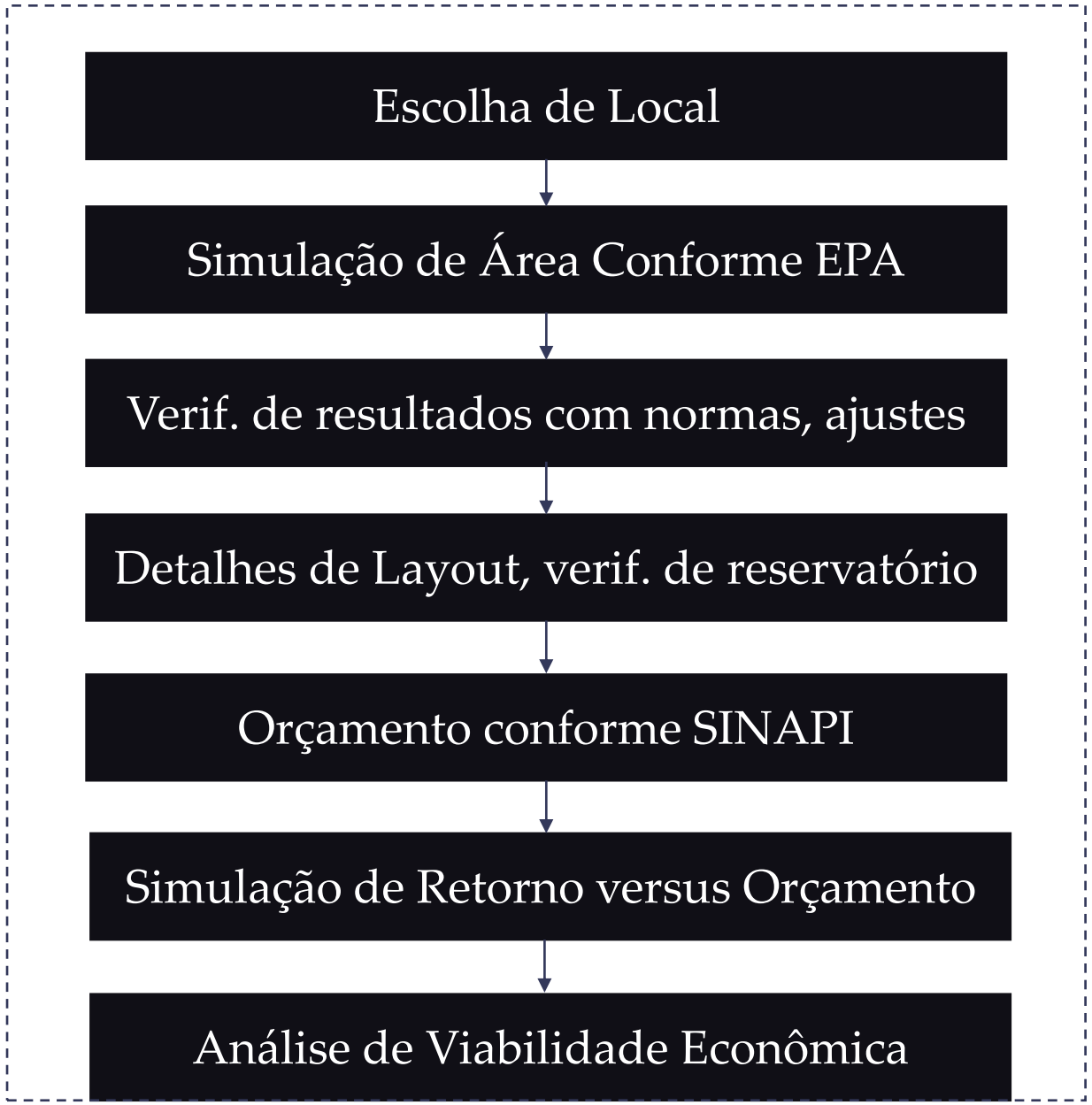


- Enquanto os resultados médios do estudo sugerem números suficientes frente regulamentações como CONAMA 430/2011, contudo, 29,5% da população paulista está em situação inferior à ideal, destacando-se na área azul ao lado.
- Estima-se a demanda bioquímica de oxigênio, assumindo contribuição diária de 160 l/hab, conforme apêndice J do relatório CETESB:

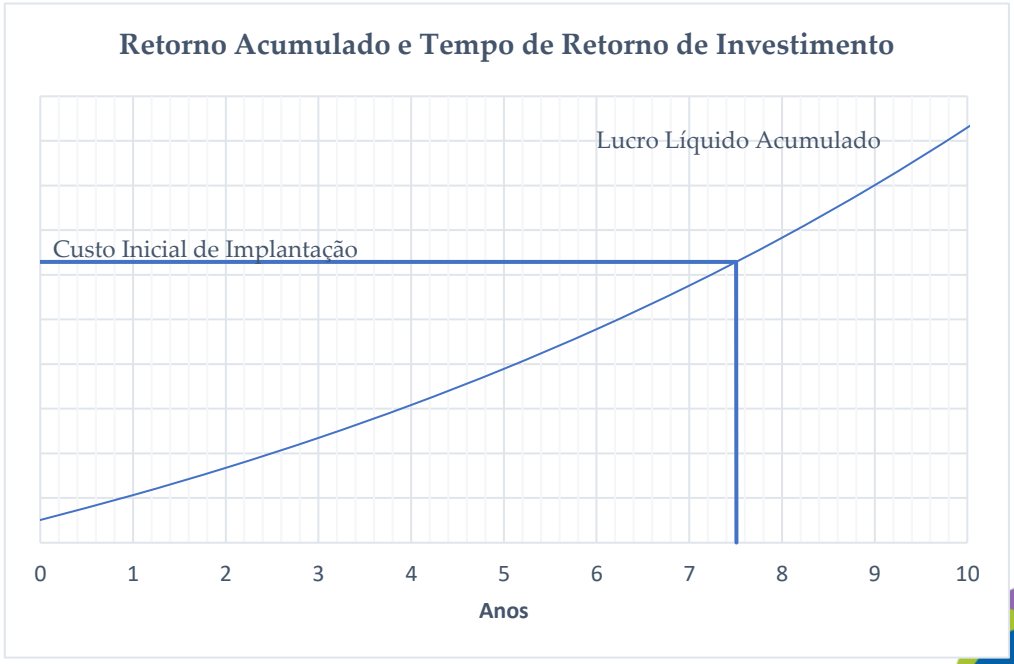
Municípios (2020)	Quantidade	População Existente (Milhões)	DBO Efluente, estimado (mg/L)
até 10.000 hab.	296	1.316.475,00	98,30
de 10.000 a 20.000	106	1.462.793,00	115,91
de 20.001 a 50.000	111	3.525.748,00	139,61
de 50.001 a 100.000	52	3.553.498,00	142,09
de 100.001 a 200.000	39	5.270.857,00	134,70
acima de 200.000	41	29.291.415,00	132,78
Total	**645**	**44.420.786**	**127,23**

DBO Efluente (2020) Estimada (mg/L)	Quantidade	População Existente (Milhões)
120,00	427	16.021.224,00
150,00	48	13.813.527,00
200,00	44	3.365.500,00
250,00	39	3.076.536,00
300,00	27	2.507.461,00
350,00	55	4.146.669,00
Baixada Santista*	5	1.489.869,00
Total	**645**	**44.420.786**

Metodologia de Estudo Proposta



- Adota-se uma metodologia de análise conforme descrita à esquerda.
- Ultimamente busca estabelecer um cruzamento custo *versus* lucro ao longo prazo estabelecendo prazo para o retorno de capital.



Panorama Tarifário do Saneamento Brasileiro

- Conforme MDR (2019):
  - Pode-se estabelecer tarifas praticadas nacionalmente, conectadas à volumetria.
  - Análise de coeficientes financeiros, como custo de operação, permite estimar retorno típico de métodos tracionais de saneamento.

Estimativa de tarifas médias para coleta e tratamento de esgoto

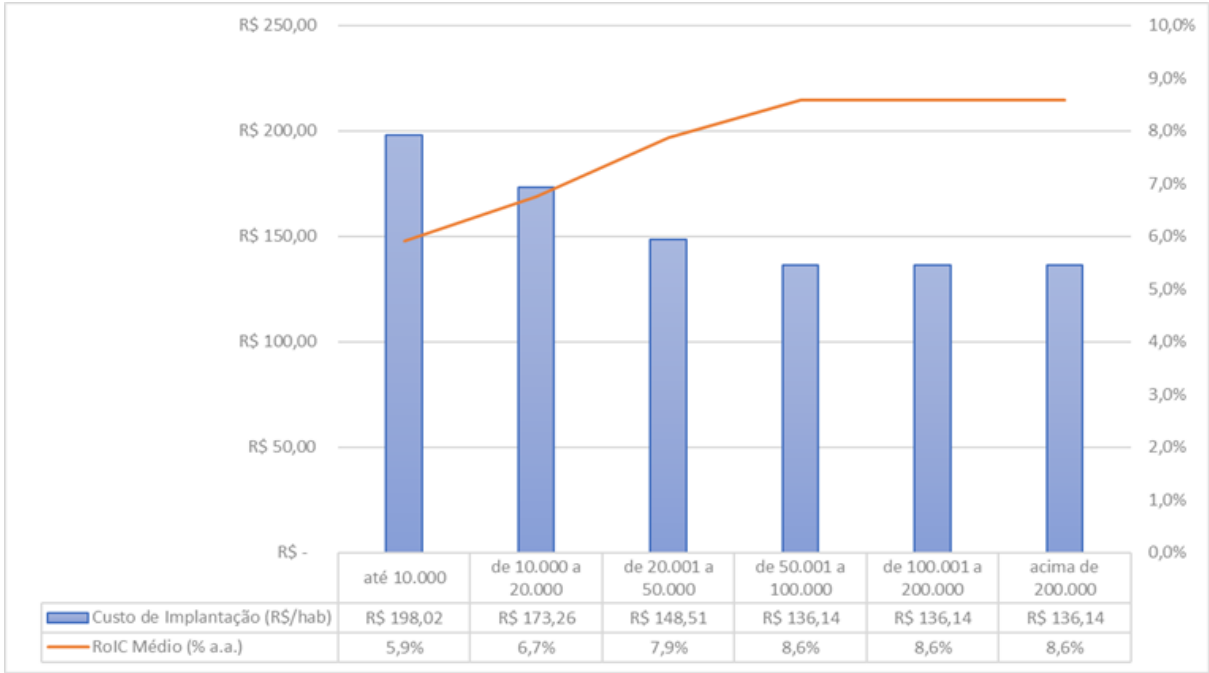
Região	Faturamento (R$/m³)	Custo Operacional (R$/m³)	IRPJ (R$/m³)	Lucro Líquido (R$/m³)
Nordeste	R$ 0,92	R$ 0,69	R$ 0,06	R$ 0,17
Norte	R$ 1,49	R$ 1,12	R$ 0,09	R$ 0,28
Sudeste	R$ 1,12	R$ 0,84	R$ 0,07	R$ 0,21
Centro-Oeste	R$ 2,13	R$ 1,60	R$ 0,13	R$ 0,40
Sul	R$ 1,88	R$ 1,41	R$ 0,12	R$ 0,35
MÉDIA	**R$ 1,50**	**R$ 1,13**	**R$ 0,09**	**R$ 0,28**

Estimativa de lucro médio per capita para coleta e tratamento de esgoto

Região	Consumo Diário (l/hab/dia)	Contribuição Anual (m³/hab)	Lucro Anual (R$/hab)
Norte	129,10	37,70	R$ 10,46
Nordeste	120,60	35,22	R$ 6,07
Centro-Oeste	147,80	43,16	R$ 17,16
Sudeste	177,40	51,80	R$ 10,88
Sul	146,40	42,75	R$ 15,07
MÉDIA	**144,26**	**42,12**	**R$ 11,69**

- Conforme ANA (2015):
  - Existem valores típicos quanto à implantação de soluções de saneamento, sendo reduzidos conforme municípios se tornam populosos.
  - Considerando as informações de retorno financeiro estimadas de MDR (2019), pode-se estabelecer taxas de retorno esperada por faixa populacional, estabelecendo *benchmark* ao nosso estudo.

Estimativa de Viabilidade Econômica em Sistemas Tradicionais de Tratamento de Esgoto



Custos de Implantação

- Conforme EPA (1993) e EPA (2000), os custos usuais são compostos por:
  - Aquisição de Terreno, considerar-se-á uma média de R$ 225,00 por m².
  - Limpeza e Terraplenagem, adota-se custos de equipamentos mecânicos.
  - Material Filtrante, notoriamente brita 1.
  - Material Hidráulico, engloba custos de geomembranas, motores e tubulação.
  - Macrófitas.
  - Custos legais e de projeto.

Tipo Serviço	Código SINAPI	Custo (R$)	Unidade
Limpeza Preliminar	98525	0,32	m²
Terraplenagem	101124	11,03	m³
Geomembrana, incl. impermeabilizador	Preço Mercado	15,20	m²
Substrato	102717	79,43	m³
Trecho Hidraulico	92833	191,45	m
	97978	746,50	unidade
	101124	11,03	m³
Macrófitas, incl. jardineiro	Preço Mercado	35,00	unidade

Custos de Operação

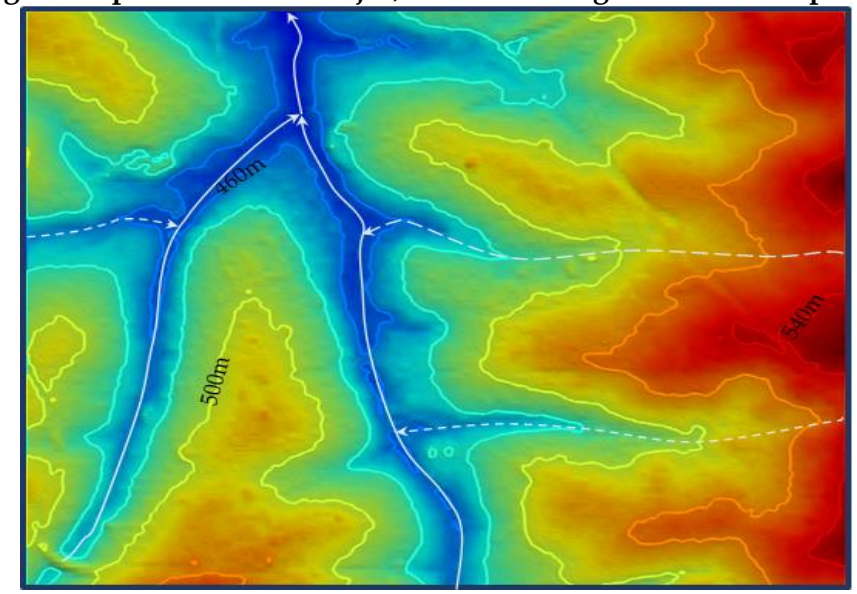
Encontro Técnico AESABESP
Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

- Conforme EPA (1993) e Paoli e Von Sperling (2013), adota-se:
  - Serviços de limpeza em geral, visando prevenção de eficiência operacional.
  - Gerenciamento de Biomassa, evita-se que o ciclo de vida da macrófita afete negativamente a performance do sistema.
  - Controle de vazão, evita-se acréscimos de custo no item anterior ao manter raízes de plantas sob altura estável.
- Optaremos pela adoção de um reservatório, regularizando vazão e executando separação de material grosseiro. Estima-se R$ 0,27 por m³.

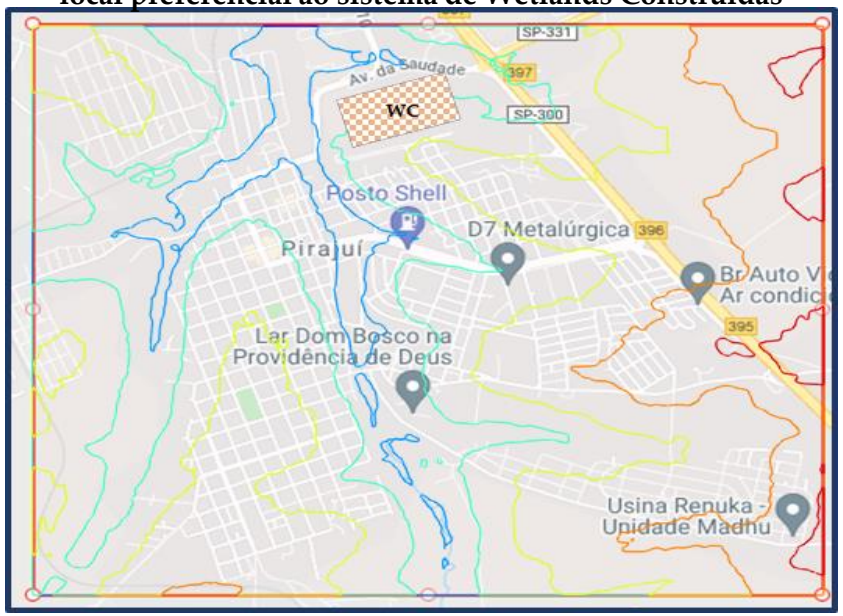
Descrição	Fonte:	Unidade	R$/Unidade
LIMPEZA MANUAL DE VEGETAÇÃO EM TERRENO COM ENXADA	SINAPI	m²	2,98
LIMPEZA DE DRENAGEM FORA DA PLATAFORMA	DER	m	2,01
LIMP.EXT.PAT.E AREAS VERDES - MEDIA FREQ	DER	m²*mês	0,28

Simulação: Pirajuí

Topografia Aproximada de Pirajuí, conforme imagens fornecidas por JAXA

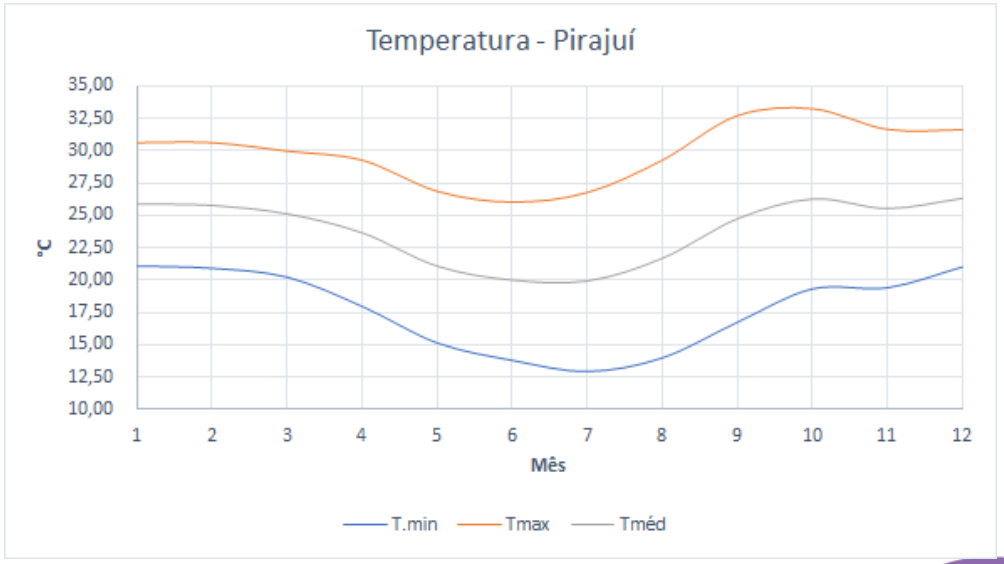


Superposição de Topografia com Área Urbana, localizando local preferencial ao sistema de Wetlands Construídas



- Opta-se pela cidade de Pirajuí para a simulação de uma implantação de um sistema de tratamento por wetlands construídas, por CETESB:
  - 20.958 habitantes.
  - DBO 330 mg/l ao rio Tietê pelo tributário rio Dourado.

- Os dados climatológicos dos últimos 10 anos são extraídos da base NASA POWER, permitindo análise do fator de decaimento mais precisa:



Simulação Inicial: Pirajuí Centralizado

- Dimensionando através do modelo EPA (1993):
  - Considera-se brita tipo 1, visando determinar o número necessário de wetlands construídas modulares de 25x75 metros com profundidade uniforme de 60 centímetros.
  - São estimadas população em duas etapas, previstas em 10 e 20 anos a partir da data de implantação original.

Cálculo conforme EPA (1993):

	Etapa Inicial	Etapa Final	
Pop,inicial	20.958		hab
Pop,projeção	29.563	41.702	hab
Qmed	4.257,07	6.005,09	m³/d
Kt,med	1,23		
Cafluen	330,00		mg/L
Cefluen	62,70		mg/L
Profundidade	0,60		m
Permeabilidade	38%		
As	25.298,85	35.686,93	m²
Base	25,00		m
Comprimento	75,00		m
$A_{wetland,unid.}$	1875,00		m²
Número Wetlands	14	19	unid.
A_{ef}	26.250,00	35.625,00	m²
TDH	1,41	1,35	dias
Ef. Proj.	81,0%	79,8%	
Lim. Percolação	900,00		m³/d
Percolação efet.	304,08	316,06	m³/d
Fator de Segurança	34%	35%	**OK**

- Utilizando dados da NASA POWER:
  - Com dados climatológicos de longo prazo pode-se estimar coeficientes de decaimento próprios para cada mês, permitindo avaliar a eficiência do sistema de tratamento nos meses de pior condição e estimar a qualidade de serviço.
  - A título de segurança, estima-se que a água tratada encontra-se mais fria que o ambiente em 2°C no cálculo.

Estimativa de Eficiência Inicial para o Sistema Centralizado em Pirajuí



Simulação Ajustada: Pirajuí Centralizado

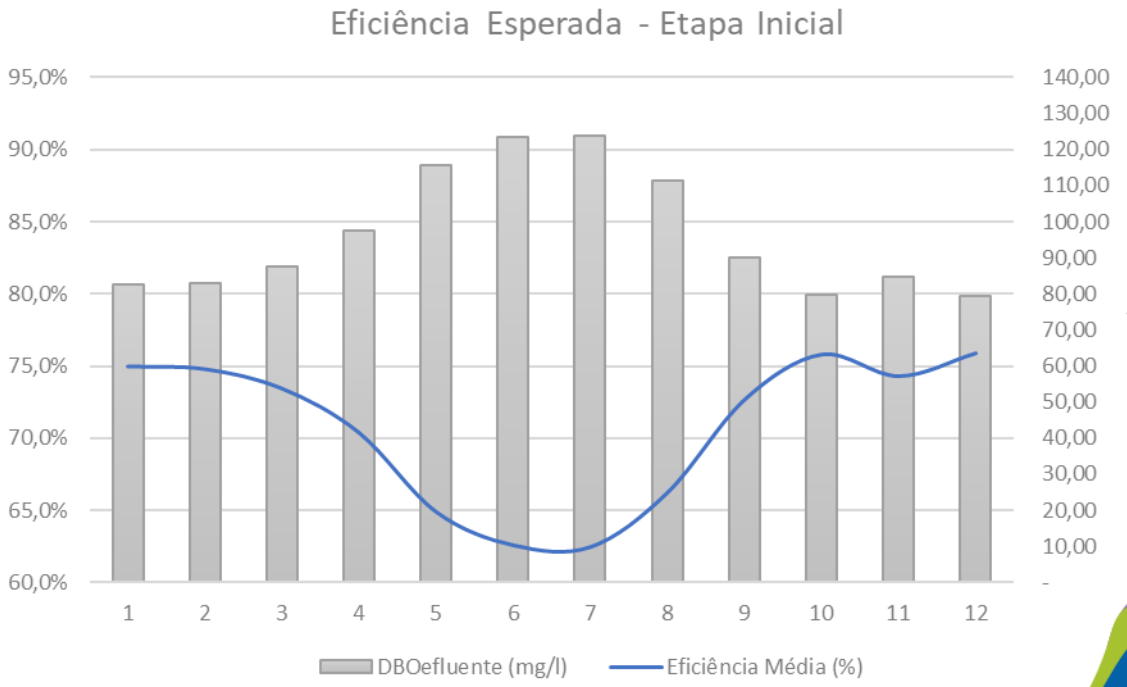
- Comparando o dimensionamento com CONAMA 430/2011:
  - O sistema dimensionado atende os parâmetros de lançamento de efluente quanto à demanda bioquímica de oxigênio.
  - A título de eficiência financeira, é possível reduzir a implantação de sistema para torna-lo mais custo-eficiente. Opta-se pela redução de unidades de wetlands construídas:

Cálculo segundo EPA (1993) revisado:

	Etapa Inicial	Etapa Final	
Pop,inicial	20.958		hab
Pop,projeção	29.563	41.702	hab
Qmed	4.257,07	6.005,09	m³/d
Kt,med	1,23		
Cafluen	330,00		mg/L
Cefluen	62,70		mg/L
Profundidade	0,60		m
Permeabilidade	38%		
As	25.298,85	35.686,93	m²
Base	25,00		m
Comprimento	75,00		m
Awetland,unid.	1875,00		m²
Número Wetlands	10	14	unid.
Aef	18.750,00	26.250,00	m²
TDH	1,00	1,00	dias
Ef. Proj.	69,7%	69,5%	
Lim. Percolação	900,00		m³/d
Percolação efet.	425,71	428,93	m³/d
Fator de Segurança	47%	48%	**OK**

- Cruzando ajuste aos dados:
  - O sistema ainda atende os parâmetros de lançamento estabelecidos em CONAMA 430/2011.
- Fora demonstrado um incremento de fluxo por módulo de WC.
- Houve uma redução de área necessária em 26,4% no final de plano.

Eficiência Ajustada para o final de etapa inicial Sistema Centralizado em Pirajuí



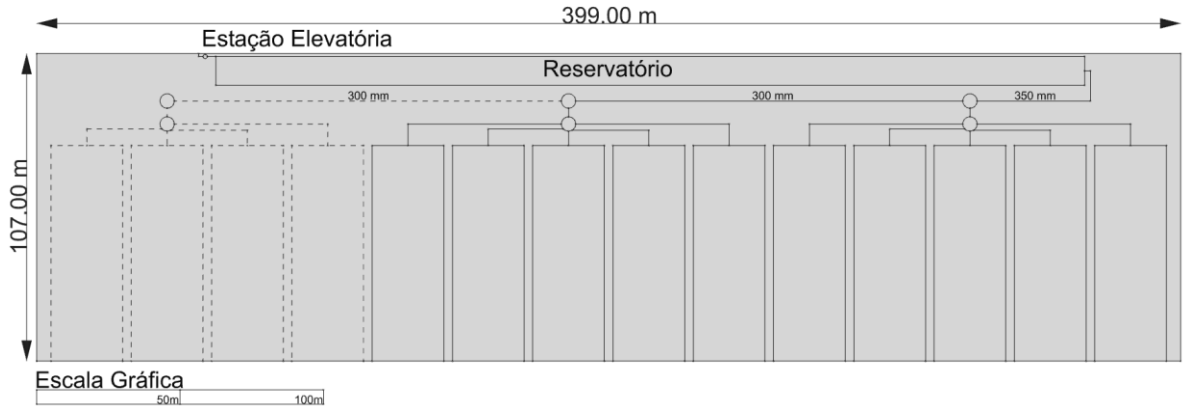
WC Pirajuí – Orçamento e Layout

Encontro Técnico AESABESP Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

Estimativa de orçamento para o sistema:

	Tipo Serviço	Código SINAPI	Custo	Unidade	Custo Total - Inicio
WC	Limpeza Preliminar	98525	R$ 0,32	m²	R$ 6.000,00
	Terraplenagem	101124	R$ 11,03	m³	R$ 227.493,75
	Geomembrana	Preço Mercado	R$ 23,48	m²	R$ 440.250,00
	Substrato	102717	R$ 79,43	m³	R$ 893.587,50
	Trecho Hidraulico	92833	R$ 191,45	m	R$ 74.761,23
		97978	R$ 746,50	unidade	R$ 5.225,50
		101124	R$ 11,03	m³	R$ 3.206,15
	Macrófitas	Preço Mercado	R$ 35,00	unidade	R$ 656.250,00
	Subtotal - WC				**R$ 2.306.774,12**
Reservatório	Limpeza Preliminar	98525	R$ 0,32	m²	R$ 1.944,00
	Terraplenagem	101124	R$ 11,03	m³	R$ 187.620,30
	Geomembrana	Preço Mercado	R$ 23,48	m²	R$ 74.055,92
	Estrutura Concreto	Preço Mercado			R$ 325.389,15
	Subtotal - Reservatório				**R$ 589.009,37**
Terreno	Terreno	Preço Mercado	R$ 225,00	m²	**R$ 9.605.925,00**
	TOTAL				**R$ 12.501.708,49**

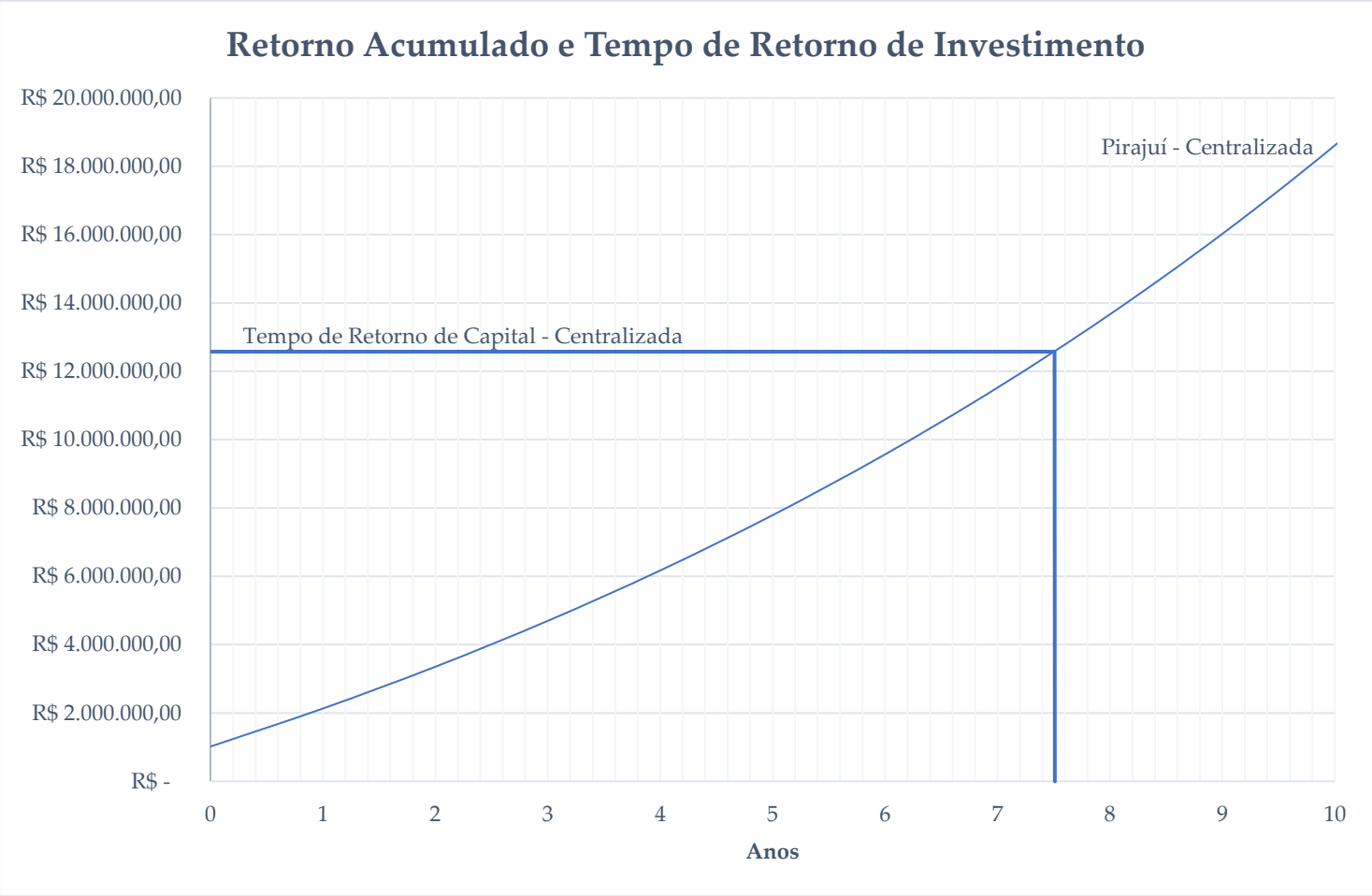
Layout inicial do sistema de tratamentos, comentado:



- Considerando os parâmetros estabelecidos de custo de implantação de wetlands construídas, estimando o reservatório necessário segundo McIntyre (1985), arranjando o layout inicial e determinando seus custos, chega-se ao orçamento inicial para o sistema de tratamento centralizado em Pirajuí.

- O custo de terreno é particularmente notório, porém representa a realidade de valores obtiveis em Pirajuí. Existe a possibilidade de executar avaliação de imóvel rural pela NBR 14653-3 considerando-o como bem de utilidade pública ou mitigar o preço através de permuta de valor financeiro com rendimentos do sistema.

Conclusão

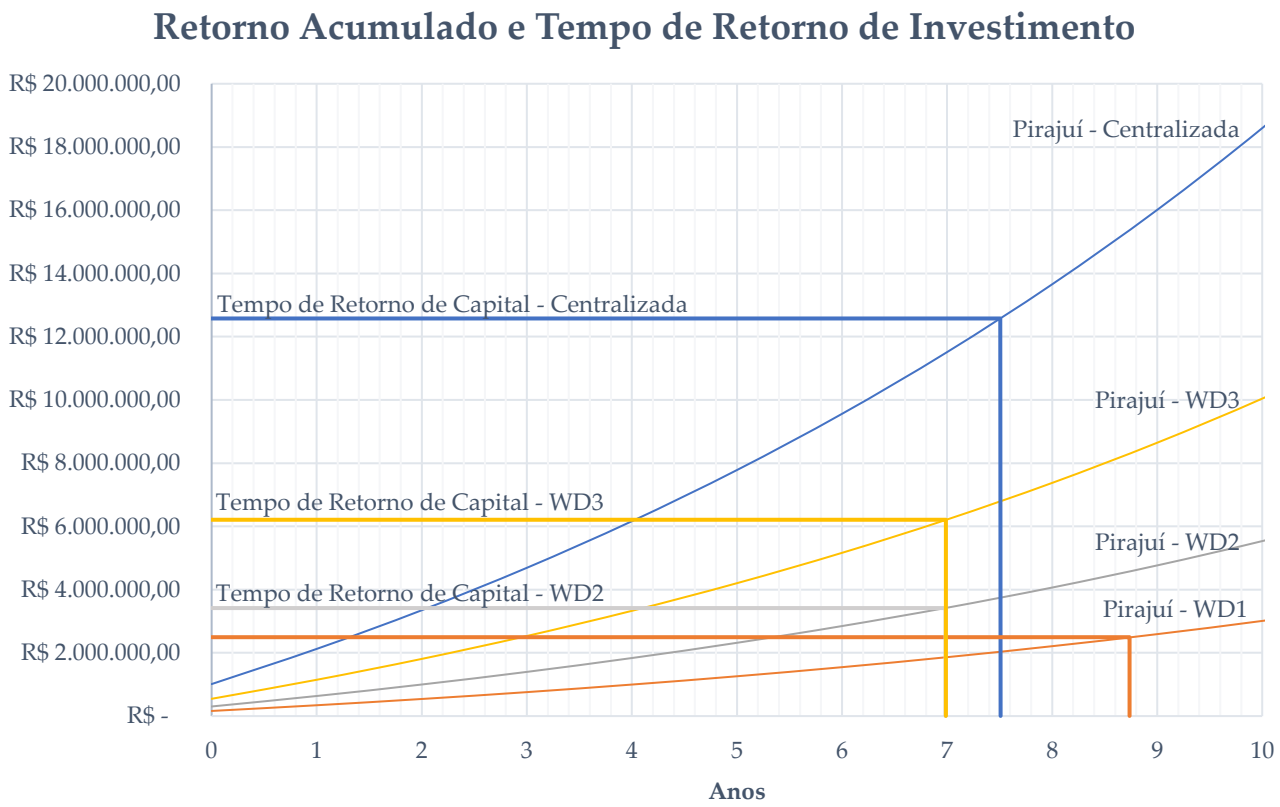


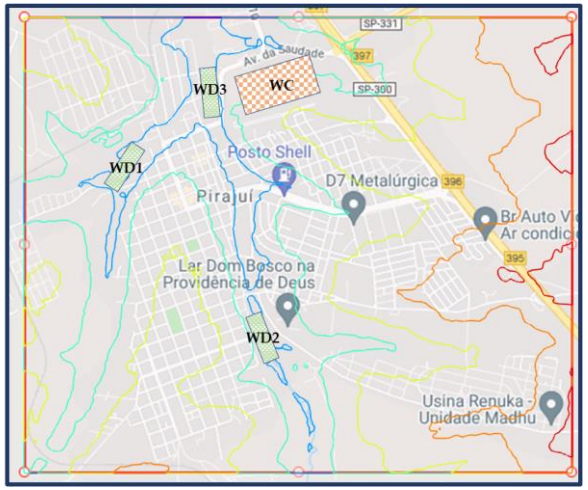
- Os dados de custo de implantação inicial se mantém os mesmos durante os anos de operação do sistema de wetlands construídas.

- Com os dados de faturamento per capita, e estimativas de crescimento populacional e inflação de longo prazo pode-se estimar o retorno ajustado do sistema, demonstrando a curva de retorno acumulado ao lado.

- Efetivamente, o sistema de tratamento centralizado proposto possui uma periodicidade de retorno prevista de 7 anos e 6 meses, uma taxa de retorno equivalente a 13,3% ao ano. *Benchmark:* retorno histórico de longo prazo de 12,37% a.a. em renda fixa.

Anexo – Sistema Descentralizado





- Aplicando a mesma rotina de cálculo, pode-se sugerir um sistema descentralizado alternativo para a cidade.
- Este sistema possui algumas vantagens ao centralizado, conforme as unidades estão espalhadas há necessidade de menores localidades para os sistemas.
- Enquanto o dimensionamento utilizado prevê a verticalização da cidade, um sistema descentralizado pode melhor representar uma cidade que se expande horizontalmente, dispensando implantação de grandes coletores troncos e a retificação de córregos e rios sem perda de capacidade de lucro.

Encontro Técnico
AESABESP
Congresso Nacional
de Saneamento e
Meio Ambiente

OBRIGADO