



ESTUDO DO IMPACTO DA ARBORIZAÇÃO NO CONFORTO TÉRMICO DE VEÍCULOS, CONSUMO DE COMBUSTÍVEL GASOLINA E EMISSÕES DE CO₂ EM FOZ DO IGUAÇU

STUDY OF THE IMPACT OF TREE COVERAGE ON THERMAL LOAD OF VEHICLES, GASOLINE CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS IN THE CITY OF FOZ DO IGUAÇU

Ricardo Morel Hartmann¹

<http://orcid.org/0000-0002-6232-6503>

Diego Moraes Flores²

<https://orcid.org/0000-0001-9485-0409>

Resumo: As cidades têm sofrido fortes consequências do aumento de temperaturas. Uma forma de se mitigar o efeito das mudanças climáticas nas cidades é através de ações de arborização. Propõe-se neste trabalho uma metodologia de cálculo do impacto que a falta de arborização em vias urbanas pode causar no aumento de consumo de combustível gasolina, emissões de CO₂ e custos com gastos de combustíveis em ambientes urbanos. Foram apresentados índices de arborização e temperatura de vias urbanas utilizando geoprocessamento, aplicando os índices NDVI e NDBI. Medições de temperatura externa e interna de um veículo sedã médio 2.0, mostraram que a falta de arborização causa um aumento médio de temperatura interna no veículo de 28,66° C nos dias de verão na cidade de Foz do Iguaçu. Este aumento de temperatura, considerando em 1545 o número de vagas de estacionamento sem arborização na região central da cidade, resultou em um aumento anual de consumo de 700 mil litros de gasolina, emissão de 1.400 toneladas de CO₂ e custos adicionais de até R\$ 4 milhões por ano.

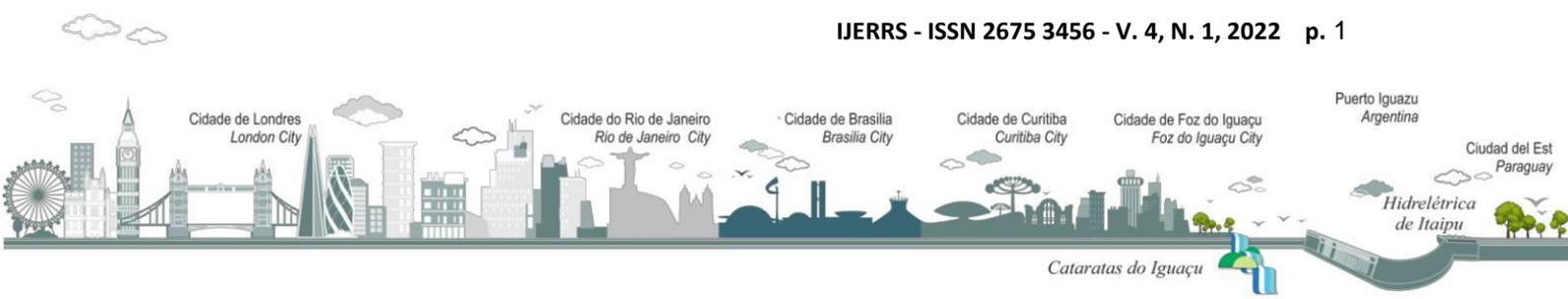
Palavras-chave: Arborização urbana. Air condicionado veicular. Gasolina. Emissões de CO₂. Geoprocessamento.

Abstract: Urban centers have been strongly influenced by of the global warming. One way to mitigate the effects of climate changes on urban centers is by means of reforestation actions. It is introduced in this paper an approach to assess the impact of lack of tree coverage in urban streets, and its influence on gasoline consumption, CO₂ emission and cost related to gasoline consumption. It was presented index of tree coverage and urban street temperature based on geoprocessing, applying the NDVI and NDBI indexes. Temperature measurements of internal and external surfaces of a medium size vehicle, have shown that the lack of tree coverage induced an increase of temperature of 28.66° C in summer day in the city of Foz do Iguaçu. This temperature raises, calculated for 1545 parking lots at downtown in Foz do Iguaçu, resulted in annual increase of 700 thousand liters of gasoline, additional emissions of 1,440 tons of CO₂ and additional costs of 4 million BRL per year.

Key Words: Urban afforestation. Air conditioning. Gasoline. CO₂ emission. Geoprocessing.

¹Prof. Dr. do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Integração Latino-americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. ricardo.hartmann@unila.edu.br

² Prof. Dr. do curso de Geografia da Universidade Federal da Integração Latino-americana, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. diego.flores@unila.edu.br





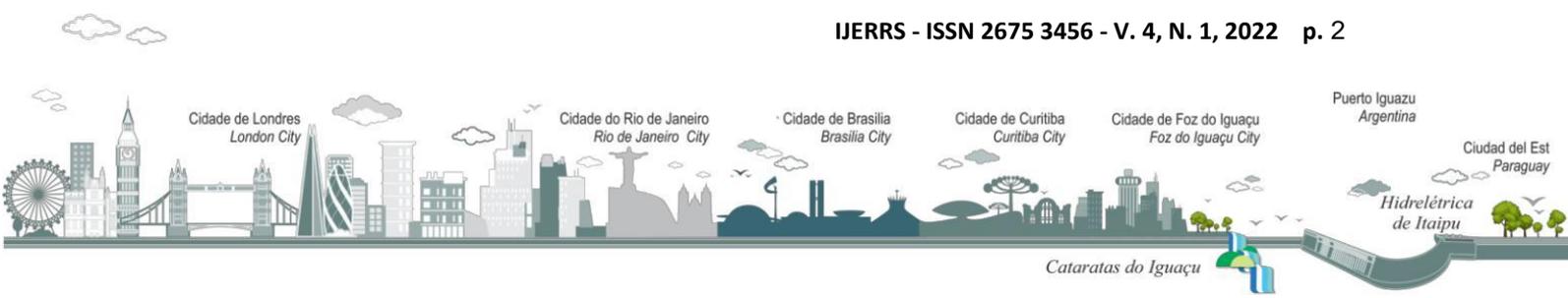
INTRODUÇÃO

As transformações científicas e tecnológicas dos últimos trezentos anos proporcionaram inúmeras melhorias na qualidade de vida da humanidade em geral: medicamentos e vacinas erradicaram diversas doenças aumentando a expectativa de vida da população, o desenvolvimento da moderna aviação civil permitiu rápidas viagens entre continentes que pareciam intransponíveis há apenas 100 anos atrás, a robótica e a automação permitiram o barateamento e popularização de inúmeros bens de consumo e, nas últimas décadas, a rápida evolução das tecnologias de informação e comunicação levaram a humanidade a níveis impressionantes de circulação de informações e comunicação instantânea.

No entanto, se as evoluções científicas e tecnológicas levaram a humanidade a níveis impressionantes de desenvolvimento e qualidade de vida, trouxeram também consequências negativas. Do ponto de vista ambiental, a utilização de combustíveis fósseis durante os últimos trezentos anos resultou no aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, que é um dos principais fatores de aceleração das mudanças climáticas antropogênicas. Estas mudanças climáticas estão cada vez mais acentuadas, como mostrou o último relatório do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2021), e vão fazer com que sejam necessárias medidas conjuntas entre as nações, bem como internamente aos países para diminuir o passo das mudanças climática e mitigar os efeitos destas mudanças nas comunidades locais.

Dentre as ações para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e do aquecimento global, destacam-se as práticas de reflorestamento e arborização urbana. As árvores têm a capacidade de absorver CO₂ da atmosfera, manter a umidade local e diminuir a temperatura nas calçadas e vias urbanas através da absorção da radiação solar incidente. Se utilizadas espécies nativas, tal efeito pode ser ainda maior. Silva (2008) expõe que a utilização de espécies nativas, permite condições naturais de regeneração, do próprio bioma local. O reflorestamento com espécies nativas tem a vantagem de fortalecer a flora local e induzir a biodiversidade.

Este trabalho tem então o objetivo de colaborar com a literatura técnica, fornecendo dados sobre o impacto da arborização urbana no conforto térmico de sistemas de condicionamento de ar de veículos de pequeno porte, no consumo de combustível e emissões





de CO₂ relacionados com o consumo de combustível gasolina. A análise de dados experimentais será realizada utilizando ferramentas de geoprocessamento, de modo a se obter projeções sobre o impacto da arborização no consumo de combustível gasolina e emissões de CO₂ na cidade de Foz do Iguaçu.

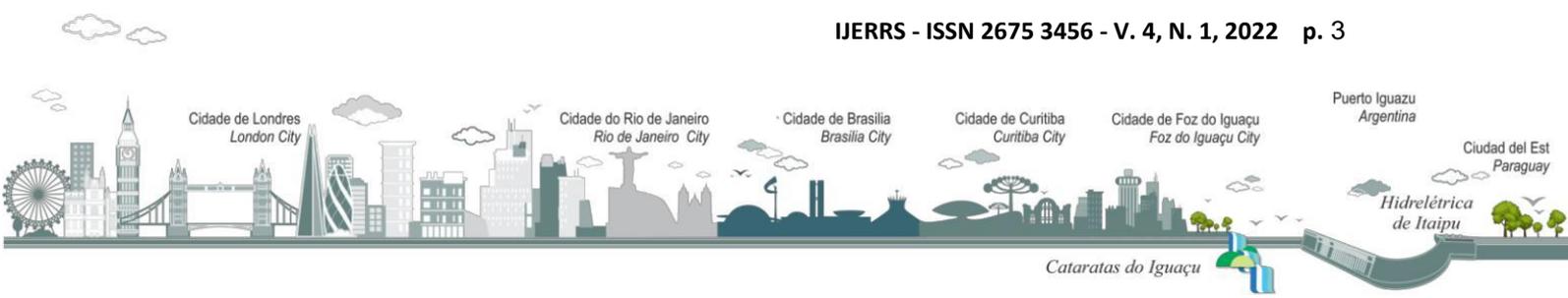
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presença de vegetação em ambientes urbanos compõe importante elemento da paisagem de uma cidade, por amenizar diversos problemas oriundos da urbanização. Ilhas de calor, controle de enchentes e alagamentos, aumento das taxas de infiltração das águas pluviais, controle térmico em microclima (conforto térmico), atenuação das consequências da presença de poluentes no ar (que levam a doenças respiratórias), diminuição de ruídos sonoros elevados, abrigo para fauna, paisagismo, lazer, atividades educacionais, são exemplos.

Realizar estudos que avaliem a presença da vegetação oportuniza a identificação de problemas, bem como, servem de parâmetro para a tomada de decisão pelos sistemas gestores das cidades. Londe e Mendes (2014) afirmam que a qualidade do ambiente urbano, que influencia na saúde física e mental dos cidadãos perpassa pela ausência e/ou fragilidade de planejamento urbano e de políticas públicas voltadas à manutenção ou implementação de áreas verdes. Neste contexto, o uso de índices de vegetação (IVs) é uma forma de obtenção de dados voltados ao embasamento para o planejamento das cidades.

Sistemas de condicionamento de ar em veículos automotores

Os sistemas de condicionamento de ar, comumente conhecidos como ar-condicionado, em veículos comerciais são de modo geral controlados pelos motoristas do veículo. Em termos de controle, os sistemas podem ser do tipo malha aberta ou do tipo malha fechada. Nos sistemas de malha aberta não há controle de temperatura interna, o motorista do veículo apenas escolhe um nível de refrigeração relacionado com a vazão de ar de refrigeração que entra no veículo. Este sistema é mais simples e barato, porém oferece menor nível de conforto térmico ao motorista. Nos sistemas de malha fechada o motorista escolhe a temperatura que





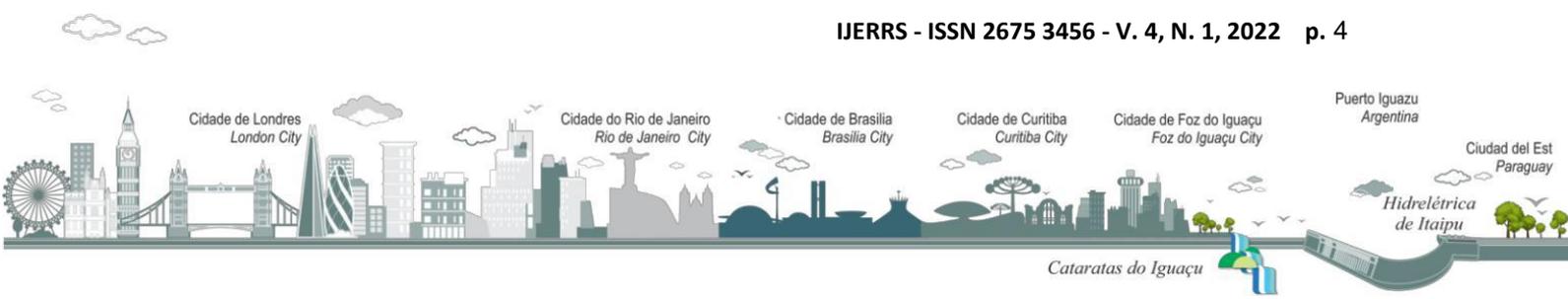
deseja, e o sistema controla eletronicamente a vazão do ar e a potência de compressão do sistema de refrigeração. Os sistemas de malha fechada são mais caros e complexos, porém garantem maior eficiência térmica e mais conforto térmico aos ocupantes do veículo.

Os sistemas de refrigeração em veículos comerciais operam sob o princípio de ciclo de refrigeração por compressão. Devido à necessidade de se comprimir o fluido de refrigeração, é necessário fornecer trabalho mecânico ao compressor de refrigeração. Este trabalho mecânico é fornecido pelo eixo do motor do veículo, ou seja, a energia que alimenta o ar condicionado deve ser fornecida pelo combustível consumido pelo veículo. Por isso, diferenças na temperatura externa, no nível de radiação solar, eficiência do sistema de refrigeração, influenciarão no consumo de combustível do veículo bem como nas emissões de CO₂.

Existem na literatura, diversos trabalhos com o intuito de melhorar a efetividade e eficiência dos sistemas de ar condicionado de veículos comerciais. A maioria dos trabalhos trata da comparação entre fluidos refrigerantes (R10, R134-a, R410-a, R1234yf), comparação e testes de novos compressores (pistões, centrífugos, espiral, etc), avaliação de sistemas de controle para malha fechada e avaliação do efeito de sistemas de refrigeração no consumo de combustível dos veículos.

Silva (2015) fez um estudo para projeto de bancada experimental para avaliação de parâmetros de sistemas de ar condicionado veicular. Foram testados em laboratório a variação de consumo de combustível para utilização e a não utilização de ar condicionado, simulando as condições ambientais médias de 5 cidades brasileiras: Curitiba, Juazeiro, São Paulo, Teresina e Vitória. Observou-se que para todas as cidades simuladas, o consumo de combustível foi maior quando o ar condicionado estava ligado, sendo a maior diferença de 45% para Teresina e a menor diferença foi 36% para Curitiba.

Gonçalves Dias (2017) reportou também experimentos em laboratório, porém utilizando dois veículos, um deles um modelo tipo *Hatch* com motor 1.0 litros (motor de 1.0 litros tem o mesmo volume de um motor com 1.000 cm³ ou 1.000 cilindradas) caracterizado na faixa de veículos populares e outro, um veículo sedã médio como motor de 2.0 litros. Foi estudada a influência da utilização de ar condicionado nos dois veículos alimentados com gasolina e etanol, medindo a emissão de poluentes e a diferença no consumo de combustível. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficácia da norma de testes FTP-75, que compara o aumento do consumo de





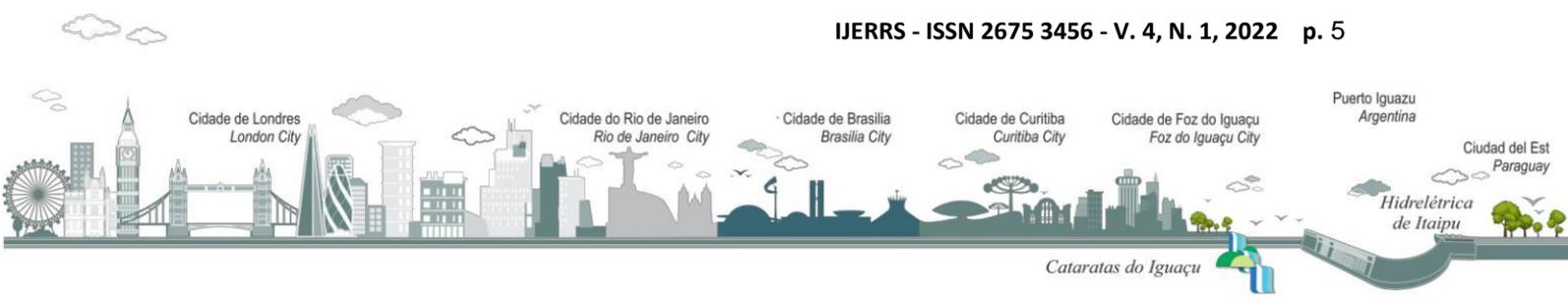
combustível causado pelo uso do ar condicionado com o aumento do consumo de combustível do veículo causado pelo arrasto aerodinâmico do veículo. Foram apresentados resultados mostrando que com o ar condicionado em funcionamento, o consumo de combustível aumentou 20% para o veículo sedã 2.0 e aumentou 15% para o veículo *Hatch* 1.0.

Kumar (2015) realizou um estudo em laboratório comparando o tempo de resfriamento no interior de um veículo utilizando diferentes fluidos de refrigeração, R134-a e R1234yf. Foram obtidos tempos de equalização de temperatura, com temperatura inicial ambiente de 32° C e temperatura final do interior de veículo de 24° C, para umidade relativa interna regulada para 60%. Observou-se que o tempo de resfriamento foi menor para o refrigerante R1234yf bem como para maiores rotações do soprador do ar condicionado. Para o caso do refrigerante R134-a, o tempo de refrigeração foi de 525 segundos para rotação do soprador em 1400 rpm e 293 segundos para rotação soprador em 2656 rpm.

Han e Huang (2004) realizaram estudo teórico com base em experimentos com 16 diferentes veículos, com o objetivo de estabelecer parâmetros numéricos para servir de base para análises de conforto térmico no interior de veículos. Utilizou-se o conceito conhecido como EHT (*Equivalent Homogeneous Temperature*). Os resultados foram utilizados como subsídios para simulações computacionais onde foi possível obter resultados com boa concordância experimental. Foi também demonstrado nos resultados, que o cálculo exato de carga térmica no interior de veículos é um trabalho extensivo e que é influenciado por inúmeras variáveis como tamanho do veículo, materiais internos do veículo, número de passageiros, carga do motor do veículo, condições ambientais e radiação solar, entre outras. Assim, dados detalhados sobre carga térmica de veículos são raros na literatura e muitas vezes se configuram como informações internas sensíveis para os fabricantes de veículos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para avaliar o impacto da temperatura interna e externa no desempenho do ar condicionado, e, por conseguinte no consumo de combustível dos veículos, deve-se realizar um balanço térmico do interior do veículo. A equação básica para balanço de energia no interior do veículo é a equação (1) (ÇENGEL; BOLES, 2013):





$$Q_{\text{ArCondic}} = m \cdot \bar{c}_p \cdot (\bar{T}_{\text{inicial}} - \bar{T}_{\text{objetivo}}) \quad (1)$$

Onde Q_{ArCondic} é a quantidade de calor que o sistema de ar-condicionado deve retirar do interior do veículo para que se obtenha uma temperatura média final $\bar{T}_{\text{objetivo}}$, temperatura esta que é definida pelo motorista do veículo. A temperatura inicial \bar{T}_{inicial} é a temperatura do veículo quando o ar condicionado é acionado. Esta temperatura \bar{T}_{inicial} pode ser tanto mais elevada quanto maior for a incidência de radiação solar no veículo. A massa m é a massa total que deve ser refrigerada no interior do veículo, composta pelo ar atmosférico, somada com os bancos e materiais do painel do veículo, somados ainda aos passageiros que estão no interior do veículo. \bar{c}_p é o calor específico médio de toda massa m que deve ser refrigerada no interior do veículo.

Na equação (1), a unidade do calor Q_{ArCondic} é dada em Joules ou Calorias, ou seja, a equação (1) calcula a quantidade total de calor, que se aplica a cálculos de regime transiente, no início da operação do veículo. Depois que o veículo entra em regime permanente deve-se utilizar uma equação para taxa de calor, que tem unidades de Watts (ÇENGEL; BOLES, 2013):

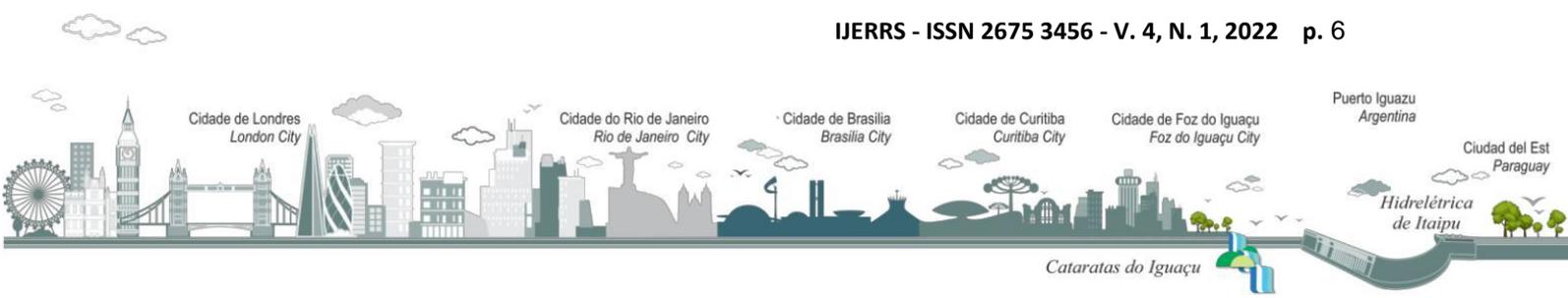
$$\dot{Q}_{\text{RegPerm}} = \dot{m}_{\text{ArCondic}} \cdot \bar{c}_p \cdot (\bar{T}_{\text{Externo}} - \bar{T}_{\text{Interno}}) \quad (2)$$

Onde \dot{Q}_{RegPerm} é a taxa de calor, em Watts, que deve ser trocada com o ambiente para manter a temperatura interna do veículo em \bar{T}_{Interno} , e $\dot{m}_{\text{ArCondic}}$ é a vazão mássica de ar refrigerado que o ar condicionado deve entregar no interior do veículo.

Qualquer que seja a análise a se realizar, seja a quantidade de calor utilizando a equação (1) ou a taxa de calor utilizando a equação (2), o grande desafio é a obtenção da capacidade térmica do interior do veículo (ÇENGEL; BOLES, 2013):

$$C = m \cdot \bar{c}_p \quad (3)$$

Onde C é a capacidade térmica em kJ/C° ou $\text{kCal}/\text{C}^\circ$, m é a massa em kg , \bar{c}_p é o calor específico médio da massa total no interior do veículo em $[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{C}^\circ]$. É muito difícil se obter o valor da capacidade térmica, uma vez que há diversos componentes com composições distintas no interior do veículo, e que tem massas diferentes. Além disso, há inúmeros modelos de veículos com distintas configurações, sendo então a informação exata da capacidade





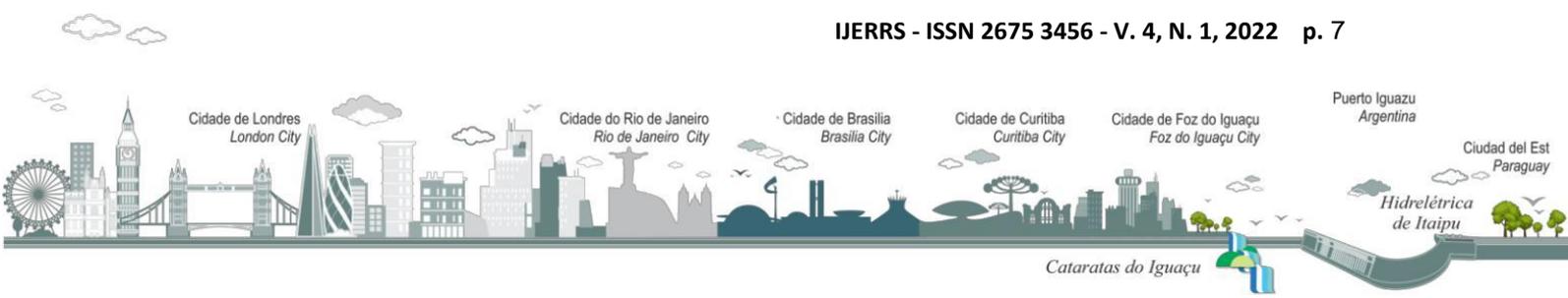
térmica de cada veículo uma informação que muitas vezes nem os próprios fabricantes dispõem. Assim, a escolha de qual sistema de ar condicionado deve-se utilizar em cada veículo bem como a verificação de seu desempenho são realizadas através de testes de operação executadas pela equipe de engenharia dos fabricantes dos veículos, sendo pouco comum dispor-se de valores exatos da capacidade térmica interna dos veículos.

Com o intuito de se realizar o cálculo da carga térmica no interior do veículo analisado neste trabalho, será aplicada metodologia baseada em analogia com resultados experimentais obtidos na literatura técnica. O trabalho de referência será (GONÇALVES DIAS, 2017), onde utilizou-se a norma ABNT NBR 6601 que trata de testes de veículos em ciclos urbanos.

A norma ABNT NBR 6601 é a norma utilizada no Brasil para se medir consumo de combustível e emissões de poluentes para o veículo quando utilizado em circulação urbana. A carga do veículo e velocidade são variáveis durante o ensaio, sendo o deslocamento total de 17,77 km com velocidade máxima de 91,25 km/h e velocidade média 34,12 km/h. Calculando o tempo através do deslocamento total e velocidade média, tem-se um tempo total de 0,52 h ou 31,24 min. É importante saber que a norma ABNT NBR 6601 é utilizada pelos fabricantes de veículos para calcular o consumo médio nominal de cada veículo, dado que é fornecido pelas concessionárias aos consumidores.

Outro dado importante é a temperatura de testes dos sistemas de ar-condicionado veicular. Um padrão de testes universalmente aceito pelos fabricantes de veículos (SILVA, 2015), considera as temperaturas de regime permanente depois de uma hora de utilização do veículo, para temperatura ambiente externa de 30° C e fluxo de radiação solar média de 1 kW/m². Para estas condições, um motorista no interior de um veículo padrão sente uma temperatura média de 39° C sem utilizar o ar condicionado e sente uma temperatura média de 25° C utilizando o ar condicionado. São estas condições as condições de projeto que todo o ar condicionado veicular deve ser capaz de alcançar.

Em resumo, considerando os dados publicados por (SILVA, 2015) e (GONÇALVES DIAS, 2017), as práticas dos fabricantes de veículos indicados bem como a norma ABNT NBR 6601, construiu-se uma analogia térmica para este trabalho, que utiliza a temperatura do interior do veículo como dado de entrada para os cálculos de consumo de combustível e emissões de CO₂. Sabendo então, que os testes de ar condicionado listados nos trabalhos





acima operam conforme a equação (1):

$$Q_{ArCondic} = m \cdot \bar{c}_p \cdot (\bar{T}_{inicial} - \bar{T}_{objetivo}) \quad (1)$$

Onde a temperatura inicial vale $\bar{T}_{inicial} = 39^{\circ}\text{C}$ e a temperatura objetivo no interior do veículo vale $\bar{T}_{objetivo} = 25^{\circ}\text{C}$. Desse modo, a diferença de temperatura nominal que o sistema de ar condicionado deve trabalhar é dada pela equação (4):

$$\Delta T = (\bar{T}_{inicial} - \bar{T}_{objetivo}) = 14^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

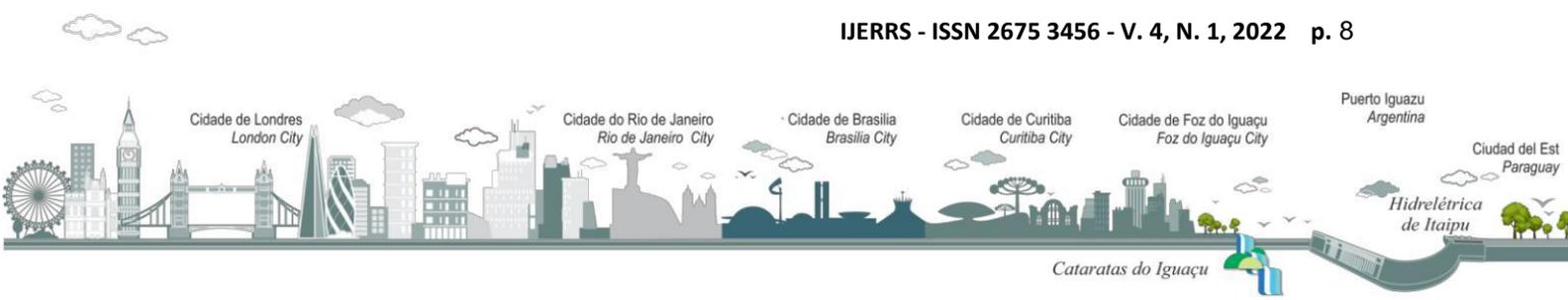
Considera-se então que os resultados de aumento de consumo de combustíveis e de emissões estão relacionados com esta diferença de temperatura. Assim, temperaturas do interior do veículo que estejam acima de 39°C irão causar consumo adicional de combustível, e este aumento de consumo será aqui considerado como diretamente proporcional ao aumento de temperatura (relação linear). O aumento no consumo de combustível causado pelo aumento da temperatura interna do veículo, $\Delta m_{Gasolina}$ será então calculado através da equação (5):

$$\Delta m_{Gasolina} = (m_{nominal}) \cdot (\%Consumo_{ArCondicionado}) \cdot \frac{(\bar{T}_{interior} - 25^{\circ}\text{C})}{(39^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})} \quad (5)$$

Onde $m_{nominal}$ é o consumo nominal de gasolina do veículo para trajetos urbanos em $\text{kg}_{Gasolina}/\text{km}$, $(\%Consumo_{ArCondicionado})$ é o consumo adicional percentual do veículo causado pela utilização do ar condicionado e $\bar{T}_{interior}$ é a temperatura no interior do veículo, no instante do início da utilização do ar condicionado. A comparação dos valores medidos de $\bar{T}_{interior}$ é o objetivo deste trabalho. O valor de $m_{nominal}$ pode ser obtido através do valor nominal de consumo volumétrico de combustível fornecido pelos fabricantes de veículos, utilizando a equação (6):

$$m_{nominal} = CV_{nominal} \cdot \rho_{gasolina} \cdot \Delta d \quad (6)$$

Onde $CV_{nominal}$ é o consumo volumétrico nominal do veículo em litros de gasolina/km, $\rho_{gasolina}$ é densidade da gasolina em kg/litro para condições ambientais de temperatura de 25°C e pressão de 1 atm, e Δd é a distância percorrida pelo veículo. Para efeitos de cálculo, será considerado neste trabalho o valor de $\Delta d = 17,77\text{km}$, conforme estabelecido pela norma ABNT





NBR 6601 que trata de consumo de veículos em trajetos urbanos.

Para o cálculo da quantidade de CO₂ emitido pelo consumo adicional de combustível induzido pelo ar-condicionado do veículo, deve-se realizar o cálculo de combustão que relaciona massa de combustível consumido com massa de CO₂ emitido. Este cálculo baseia-se na combustão estequiométrica de gasolina com ar atmosférico seco (ÇENGEL; BOLES, 2013), conforme a equação (7):



Realizando o balanço de massa entre o lado direito e o esquerdo da equação (7), chega-se ao valor de 3,09 kg de CO₂ para cada kg de gasolina consumida pelo motor (TURNS, 2012).

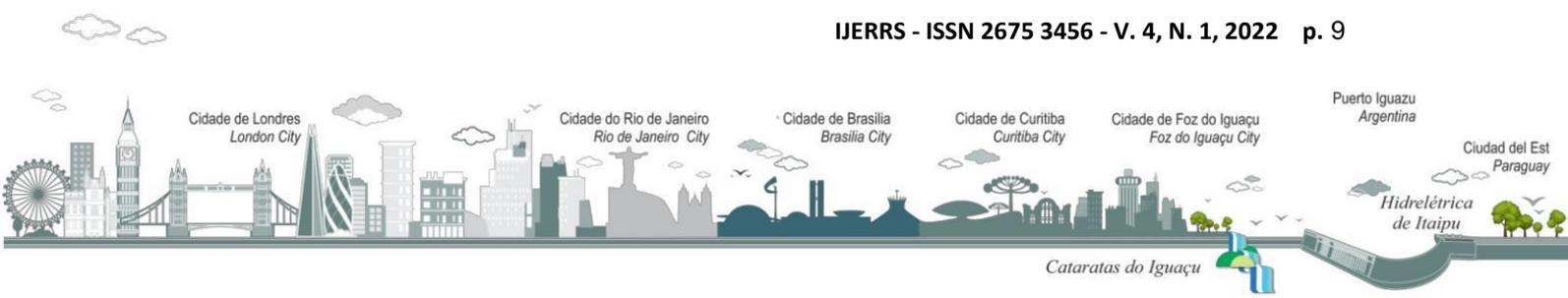
METODOLOGIA PARA GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO

Foram utilizadas imagens de satélite com acesso gratuito e com a melhor resolução espacial possível, com datas próximas em relação às datas de coleta de dados. Os diferentes tempos de revisitas dos satélites e dias com cobertura de nuvem interferem na precisão entre as datas. No entanto, as datas de seleção de imagens procuraram corresponder às temperaturas médias das datas de coleta *in loco*.

Satélite Landsat 8

As imagens do Landsat 8 perfazem quase todo o globo, com revisita a cada 16 dias. O tamanho aproximado da cena é de 170 km ao norte-sul por 183 km a leste-oeste. A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores, (OLI e TIRS) com nove bandas espectrais incluindo a banda pancromática. Foi utilizada a banda B10 para procedimento de elaboração de um mapa de temperatura da superfície da terra.

A banda 10, correspondente à faixa do infravermelho termal (10.6 - 11.19 μm - micrômetro), com resolução espacial de 100 metros do satélite Landsat-8 sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor), órbita 224, ponto 78, com data de passagem 13/03/2021 e horário central de 13h36. Para o cálculo de temperatura da superfície da terra foram aplicadas equações e





metodologia segundo Coelho e Correia (2013). Informações de conversão para radiância extraídos dos metadados da imagem do Landsat-8, banda 10, conforme a equação (8):

$$L\lambda = ML * QCal + AL \quad (8)$$

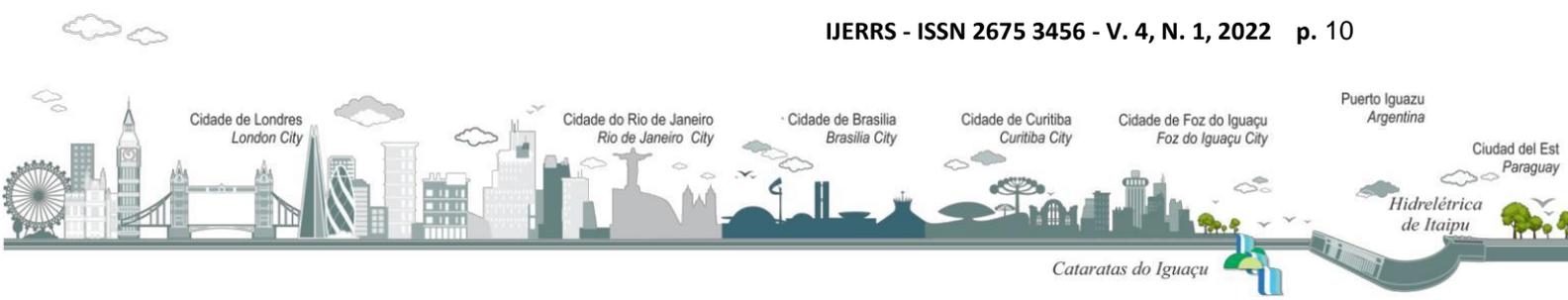
Onde $L\lambda$ é a Radiância Espectral do sensor de abertura em Watts/($m^2 \text{ sr } \mu\text{m}$), ML é um fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 = 3.3420E-04, AL é o fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10 = 0,10000 e $Qcal$ é o valor quantizado calibrado pelo pixel em $DN =$ Imagem banda 10. Em seguida aplicou-se a equação (9) para a transformação dos valores obtidos em escala de temperatura Kelvin (K), transformados em valores de temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), através do acoplamento na equação do valor absoluto (273,15):

$$T = K_2 / \ln (K_1 / L\lambda + 1) \quad (9)$$

Onde T é Temperatura efetiva no satélite em Kelvin (K) – convertido diretamente em Celsius da calculadora *raster* do Qgis, K_2 é a constante de calibração 2 = 1.321.08 (K), K_1 é a constante de calibração 1 = 774.89 (K) e $L\lambda$ é a radiância espectral em Watts/($m^2 \text{ sr } \mu\text{m}$). As equações (8) e (9) foram então inseridas no SIG (Sistema de Informações Geográficas) QGis 3.16 de forma conjunta para geração de arquivo *raster* de saída das temperaturas (TC), relativas a cada cena de interesse. Ao final foi utilizada a banda PAN (0,45 – 0,90 μm) para aumento da resolução com aplicação do procedimento de *Pansharpening*, processo de fusão de imagens pancromáticas de alta resolução (PAN: 0,45 - 0,90 μm – 2m) e multiespectrais de baixa resolução (0,63-0,69 μm /RED – 0,77-0,89 μm -NIR – 8m).

Satélite CBERS 4A

As imagens utilizadas do CBERS 4A possibilitaram o cálculo do índice de vegetação (NDVI). As imagens correspondem ao sensor WPM com órbitas/ponto: 162/128-129 data de 20/03/2021 horário central 14h07. No geral, o sensor apresenta imagens multiespectrais e pancromática de Ampla Varredura (WPM). A câmera WPM fornece imagens com resolução panorâmica de 2 m e resolução multiespectral de 8 m simultaneamente na órbita do satélite.





Com as bandas RED e NIR, NDVI - Normalized Difference Vegetation Index, aplicado determinou a cobertura vegetal da área de coleta. Neste estudo, utilizou-se inicialmente o índice para estimar as áreas com cobertura vegetal no local. O NDVI é um dos índices mais favoráveis para a aplicação nos monitoramentos de vegetação, proporciona também, uma medida da quantidade de vegetação ou condição dentro de um pixel, além de contribuir com a compreensão dos impactos de mudanças de cobertura em relação à temperatura na superfície terrestre (ORHAN, 2014, ALMEIDA, 2020). A equação definida por (Tucker, 1979) para gerar a cenas com NDVI é a equação (10):

$$NDVI = NIR - RED / NIR + RED \quad (10)$$

A equação que tem como variáveis as bandas do vermelho e infravermelho próximo. A normalização da razão simples estabelece um intervalo de 0 a 1. Sendo o valor 1 referente ao maior vigor vegetativo e mais próximo de 0 ausência de vegetação ou menor vigor.

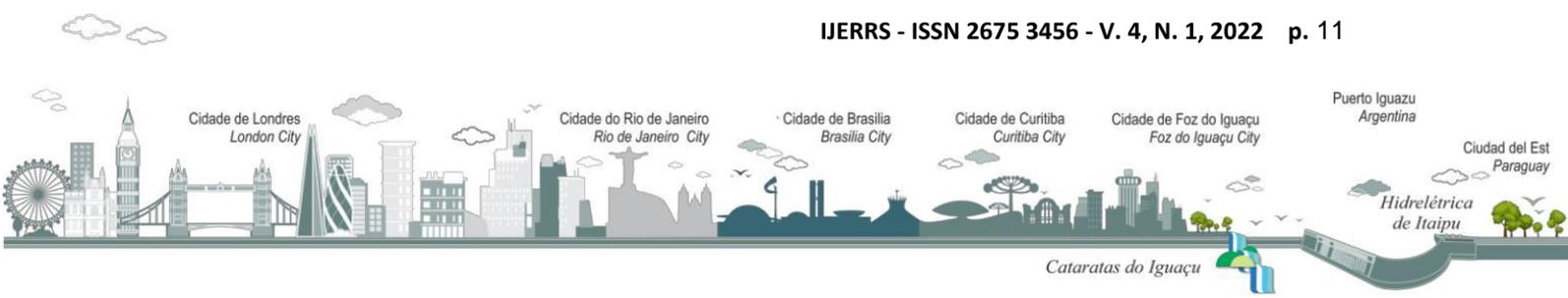
Satélite Sentinel 2

Foi utilizada imagem do satélite Sentinel-2A, sensor MSI, da missão imageadora multispectral do Programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) da ESA, para observação da Terra. As imagens deste serviço possibilitam produtos (absorção e distorção) em alta resolução (10 m), e com alta capacidade de revisita (5 dias), a data selecionada em questão foi de 21/11/2020 órbita 124, ponto, ponto 24 com horário de passagem de 13h42.

Com a imagem Sentinel foi gerado o Índice Acumulado de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Built-Up Index - NDBI*), que descreve a densidade de área construída acumulada. O método desenvolvido por Zha et al. (2003), utiliza as bandas do Infravermelho Próximo (banda 11) e do Infravermelho Médio (banda 8) do sensor, conforme a equação (11):

$$NDBI = (IVM - IVP) / (IVM + IVP) \quad (11)$$

O NDBI é calculado como uma razão entre o infravermelho de onda curta (SWIR) e o infravermelho próximo (NIR), os índices, no geral variam de -1 a 1. Em relação ao NDBI, foi extraído dos valores *raster* do mapa final, os valores de intervalo do *maps* para as linhas (vetores)





que representam todo o arruamento da área urbana da cidade de Foz do Iguaçu. Para isso, selecionou-se a Base de Faces de Logradouros (IBGE, 2019) do município e seguiram-se os seguintes procedimentos no SIG Qgis 3.16: Extração de vértices> Amostragem dos valores raster (*sample raster values*)> união de atributos por localização (sumário).

Ao final foram calculadas as extensões de todos os segmentos de ruas do recorte da base de faces de logradouros e realizada a razão em relação a extensão de um sedã médio (5m) na calculadora de campo do SIG e feita segmentação de seleção por expressão, para a obtenção dos trechos de estacionamento para veículos com arborização e sem arborização. Os produtos (dados) obtidos dos procedimentos foram exportados em planilha eletrônica para a geração de outros cálculos de consumo energético pertencente ao artigo.

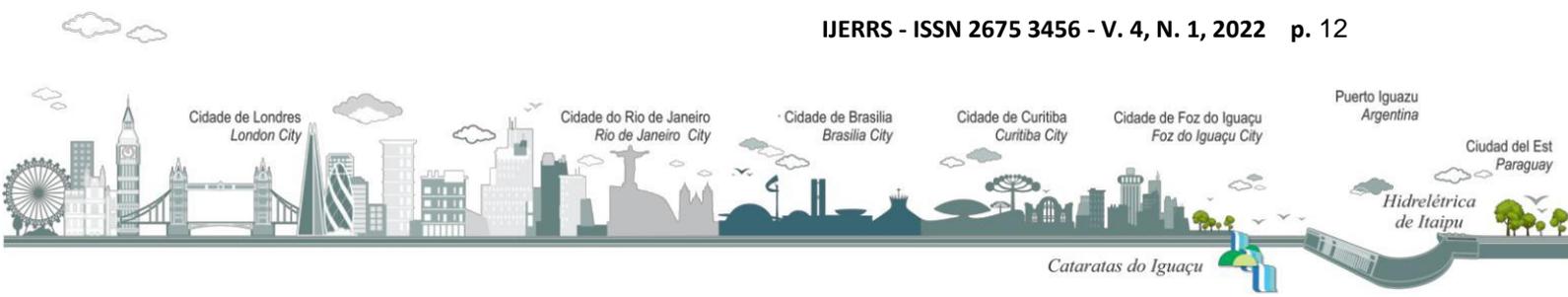
RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizadas medições de temperatura interna e externa de um veículo sedã médio com motor 2.0, para dias ensolarados comparando o veículo estacionado por 1 hora em um local bem arborizado e estacionado por 1 hora em local sem árvore alguma. Os locais analisados foram o ponto 1, com arborização, na Avenida Pedro Basso nº 727 e o ponto 2, sem arborização, na Avenida Pedro Basso nº 1000, ambos em Foz do Iguaçu no Paraná. A Figura 1 mostra uma foto de satélite indicando os pontos 1 e 2.

Figura 1 – Localização dos pontos 1 e 2 para coleta de dados de temperatura.



Fonte: Os autores.



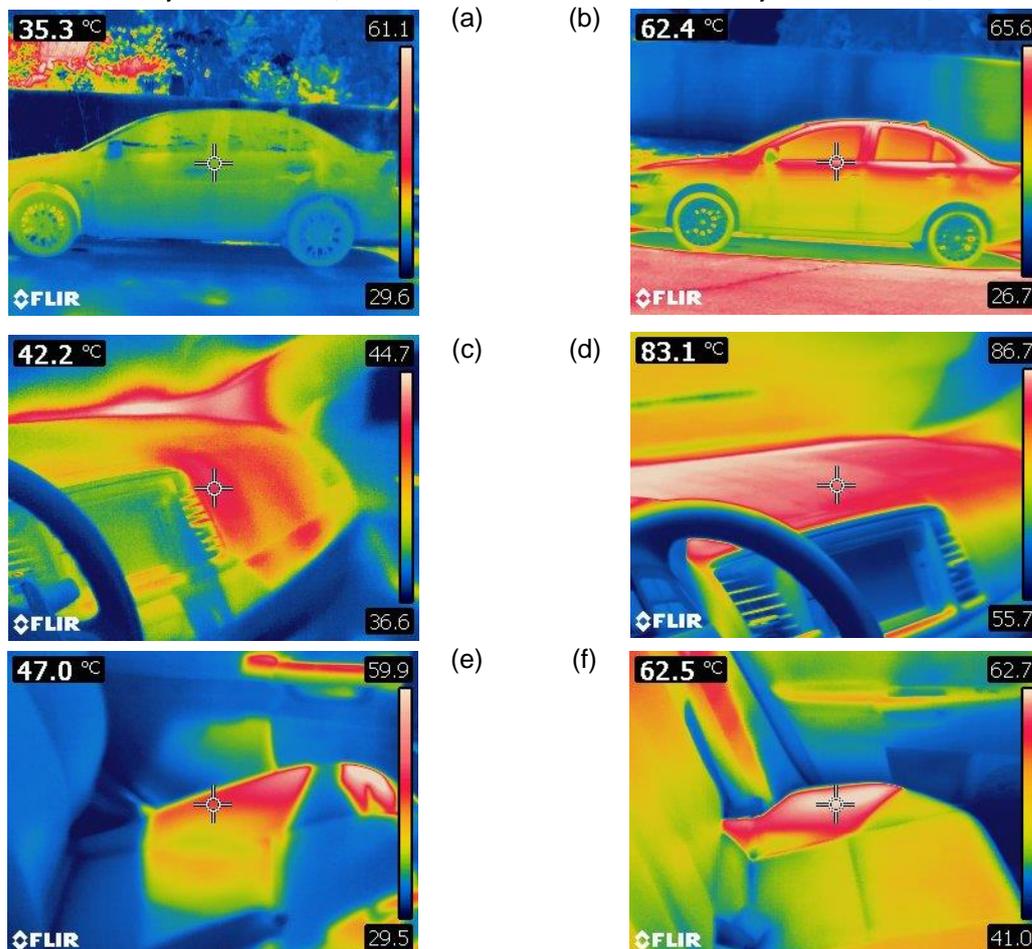


Foram retiradas fotografias de um veículo sedã 2.0, utilizando uma câmera da marca FLIR, modelo EB60 bx para fotos no espectro infravermelho (IR). Foram retiradas um total de 200 fotografias em três dias diferentes de verão: no dia 10 de dezembro de 2020, 14 de janeiro de 2021 e 08 de março de 2021. A Figura 2 mostra 6 fotos representativas retiradas nos pontos 1 e 2, indicados na Figura 1.

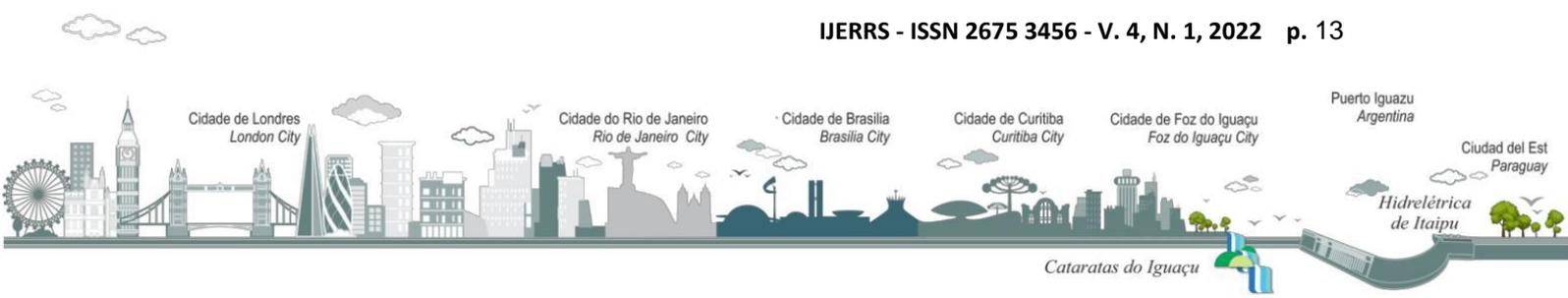
Figura 2 – Fotos representativas retiradas no ponto 1 e ponto 2. As fotos a), c) e e) retiradas na sombra e as fotos b), d) e f) retiradas no ponto sem arborização. As fotos a) e b) retiradas da parte exterior do veículo e as fotos c), d), e) e f) retiradas do interior do veículo. O valor de temperatura mostrado no canto superior esquerdo de cada foto refere-se ao ponto indicado pela cruzeta no centro de cada foto.

Veículo estacionado na sombra. Av. Pedro Basso nº 727. Dia 14 de janeiro de 2021, 12:10h.

Veículo estacionado **no sol**. Av. Pedro Basso nº 1000. Dia 14 de janeiro de 2021, 13:10h.



Fonte: os autores.





Realizando o tratamento estatístico das temperaturas medidas nas 200 fotografias IR conforme as Figuras 2-a) até 2-f), obteve-se a temperatura média do interior do veículo para uma região arborizada e para uma região não arborizada. Os resultados estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados para obtenção de energia e exergia.

Combustível	Temperatura interna do veículo [°C]	Incerteza na temperatura [°C]
Estacionamento sombreado com árvores	33,72	+/- 2,25
Estacionamento sem árvores	62,38	+/- 2,83

Fonte: os autores.

É possível verificar na Tabela 2 que a falta de arborização induz a um aumento médio na temperatura interna do veículo de 28,66°C. Este aumento de temperatura fará com que o sistema de ar-condicionado tenha que trabalhar mais, consumindo mais combustível e emitindo mais CO₂ na atmosfera. Para se avaliar o aumento de consumo de gasolina causado pelas temperaturas mostradas na Tabela 1, deve-se calcular a equação (5) com o auxílio da equação (6). Para isso, serão necessários os parâmetros indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados necessários para avaliar as equações (5) e (6).

CV _{nominal} [litros/km]	0,0833
ρ_{gasolina} [kg/l]	0,690
Δd [km]	17,77
(%Consumo _{ArCondicionado})	+20%

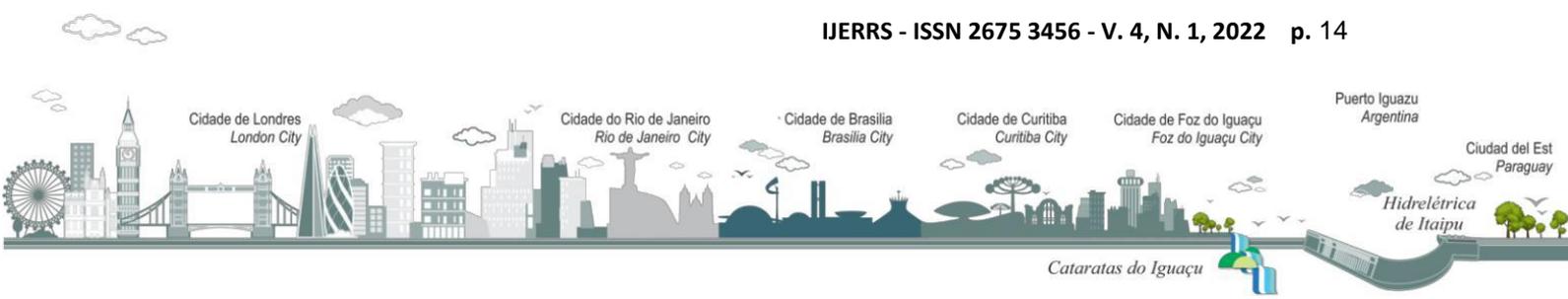
Fonte: os autores.

Assim, a equação (5) fica,

$$\Delta m_{\text{Gasolina}} = \left(0,0833 \frac{l}{km} \cdot 0,69 \frac{kg}{l} \cdot 17,77 km\right) \cdot (120\%) \cdot \frac{(62,38^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})}{(39^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})} \quad (12)$$

O valor da massa de combustível adicional causado pelo aumento de temperatura no interior do veículo vale então,

$$\Delta m_{\text{Gasolina}} = 3,27 \text{kg de gasolina} \quad (13)$$





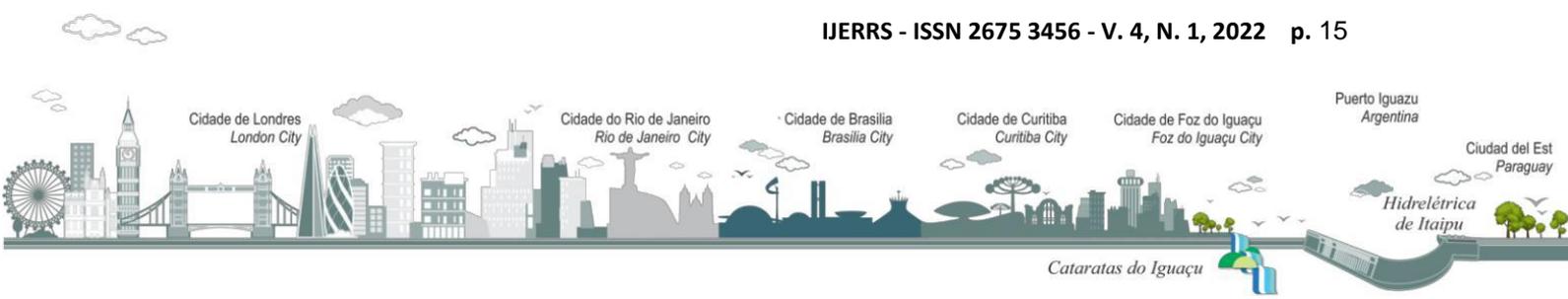
Sabendo que a relação entre emissão de CO₂ e consumo de gasolina é 3,09 kg de CO₂ para cada kg de gasolina, o resultado da equação (7) resulta em,

$$\Delta m_{\text{CO}_2} = 10,11 \text{ kg de CO}_2 \quad (14)$$

Considerando que o veículo circula em 20 dias de trabalho por mês, e que a estação de verão com dias mais quentes dura três meses, tem-se um máximo de 60 dias por ano com o aumento de consumo de gasolina e emissões de CO₂ calculados com as equações (8) e (9). Assim, tem-se que a falta de arborização causa um aumento de 196,4 kg de gasolina, ou 284 litros de gasolina, que representam emissões adicionais de 605 kg de CO₂ por ano/veículo sedã médio. Sabendo que em outubro de 2021 o litro de gasolina custava aproximadamente R\$ 6,00, a falta de arborização pode indicar custos adicionais de R\$ 1.704,00 por ano/veículo sedã médio.

Os resultados mostrados nas equações (13) e (14) foram calculadas considerando que o sistema de ar-condicionado do veículo tem ainda capacidade adicional para ser acionada. No entanto, acontece muitas vezes que em cidades quentes como Foz do Iguaçu, os veículos mesmo quando estacionados em regiões arborizadas, são ligados com ar condicionado na potência máxima. Assim, a falta de arborização vai resultar que o ar condicionado tenha que trabalhar em capacidade máxima por um período maior de tempo, ou no pior das hipóteses não vai conseguir resfriar o veículo, perdendo a sua eficácia e não realizando a sua função de projeto.

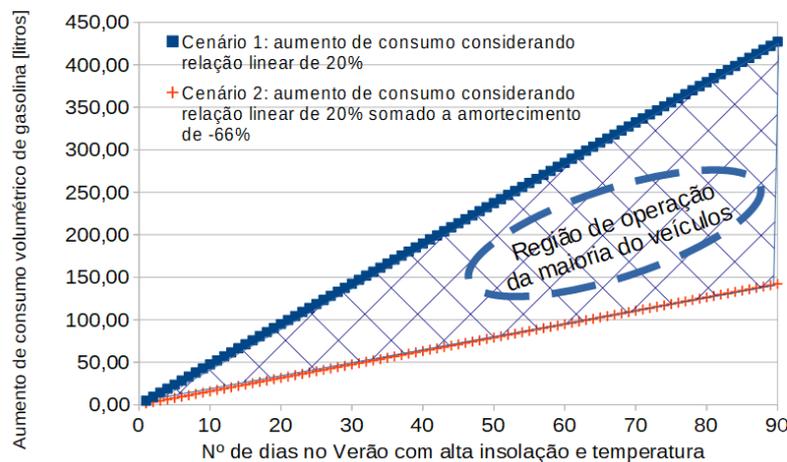
Deve-se salientar ainda, que o supracitado aumento de 20% no consumo de combustível causado pelo uso do ar condicionado é de 15% para veículos populares. Assim, os resultados extrapolados para a cidade de Foz do Iguaçu devem levar em consideração a quantidade e modelos de veículos que circulam na cidade. Por isso, o mais adequado é trabalhar com projeções de cenários, onde o cenário 1 com aumento de consumo mais elevado é o cenário calculado utilizando a equação (7). O cenário 2 é o caso em que o resultado obtido pela equação (7) é dividido por 2/3, que é o quociente relacionado com a menor potência de veículos populares, com as diferentes distâncias percorridas por cada veículo dentro da cidade e pelas diferenças de capacidade térmica do ar-condicionado da cada veículo. A Figura 3 mostra a comparação entre os cenários 1 e 2 para o aumento de consumo de combustível com ar condicionado, a Figura 4 mostra a comparação entre os cenários 1 e 2 para o aumento de emissão de CO₂ com ar condicionado e a Figura 5 mostra a comparação





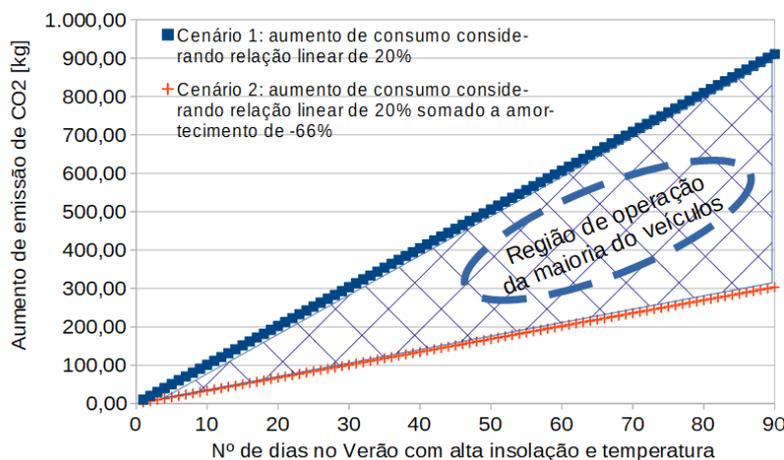
entre os cenários 1 e 2 para o aumento de gastos, em R\$, com consumo de combustível com ar condicionado. As Figuras 3, 4 e 5 foram construídas considerando um único automóvel.

Figura 3 – Cenários de aumento de consumo volumétrico de gasolina causado pelo uso de ar-condicionado e pelo aumento de insolação devido à falta de arborização. A região hachurada entre os cenários 1 e 2 corresponde a região de operação para a maioria dos veículos que circulam na cidade. Resultados calculados para um único veículo.



Fonte: os autores.

Figura 4 – Cenários de aumento de emissão de CO₂ causado pelo uso de ar-condicionado e pelo aumento de insolação devido à falta de arborização. A região hachurada entre os cenários 1 e 2 corresponde a região de operação para a maioria dos veículos que circulam na cidade. Resultados calculados para um único veículo.



Fonte: os autores.

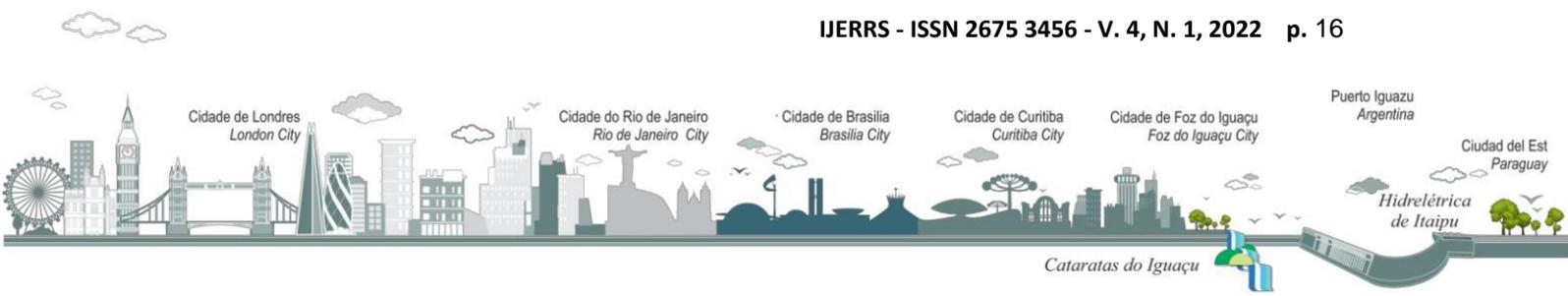
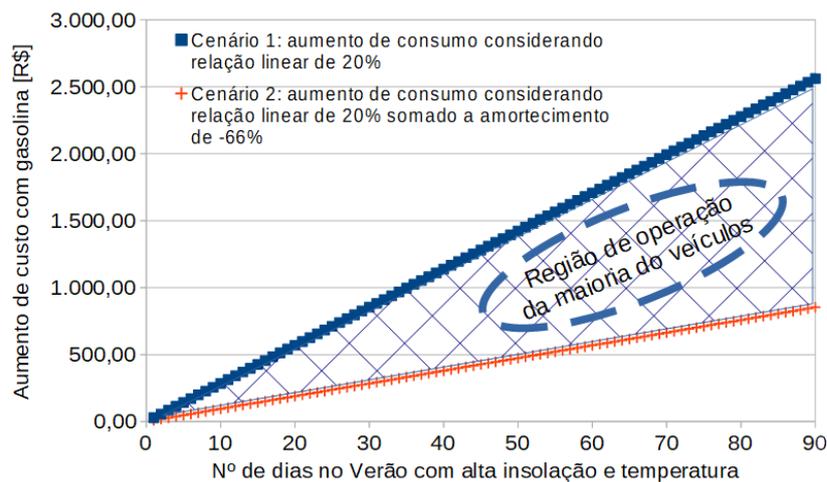




Figura 5 – Cenários de aumento de custos com gasolina causado pelo uso de ar-condicionado e pelo aumento de insolação devido a falta de arborização. A região hachurada entre os cenários 1 e 2 corresponde a região de operação para a maioria dos veículos que circulam na cidade. Resultados calculados para um único veículo.



Fonte: os autores.

Resultados índices de vegetação e área construída

Os resultados de índice NDVI demonstram os trechos de vegetação arbórea da rua Pedro Basso, bem como as demais conectadas, identificando corredores de arborização (Figura 6).

Quando comparado com o mapa de temperatura da superfície da Terra (Figura 7), observa-se maiores temperaturas no trecho onde não há vegetação existente. Assim, os resultados do índice NDVI mostrados nas Figuras 6 e 7 estão em concordância com os valores de temperatura medidas para o veículo, mostrados na Figura 2.

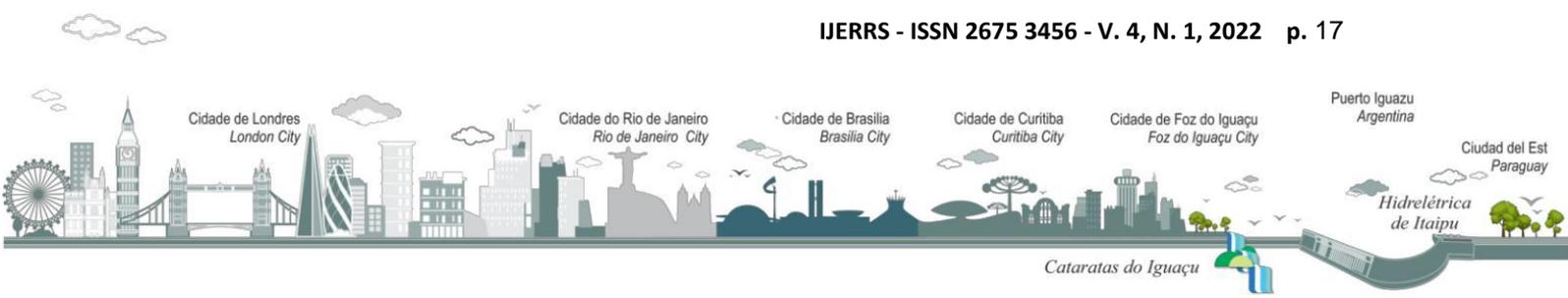
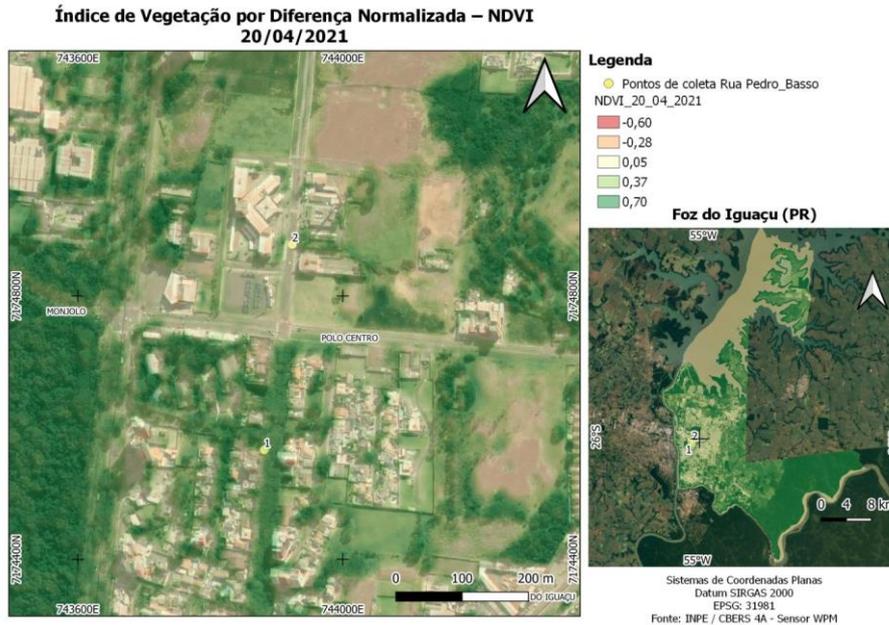


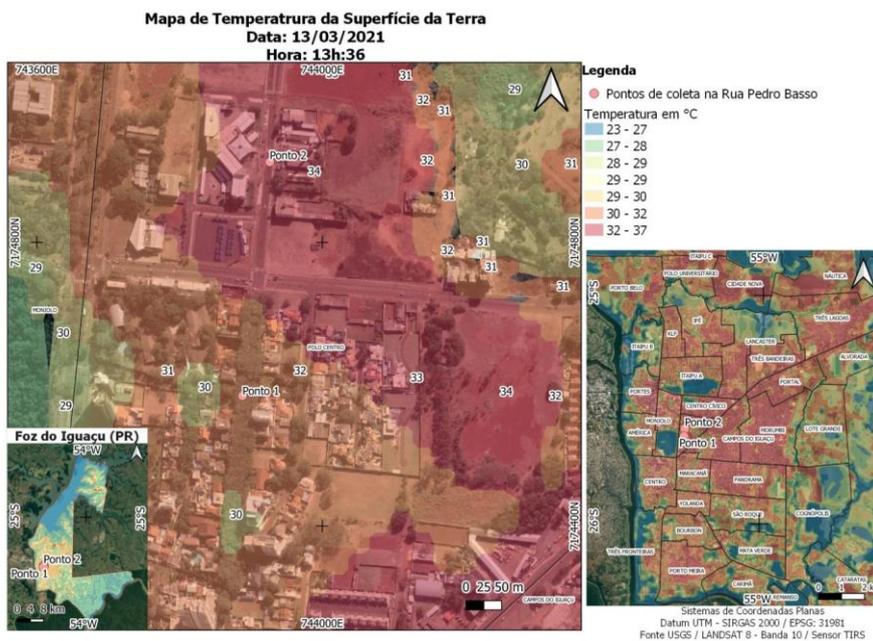


Figura 6 – Resultados de índice NDVI para os pontos 1 e 2 sob análise.

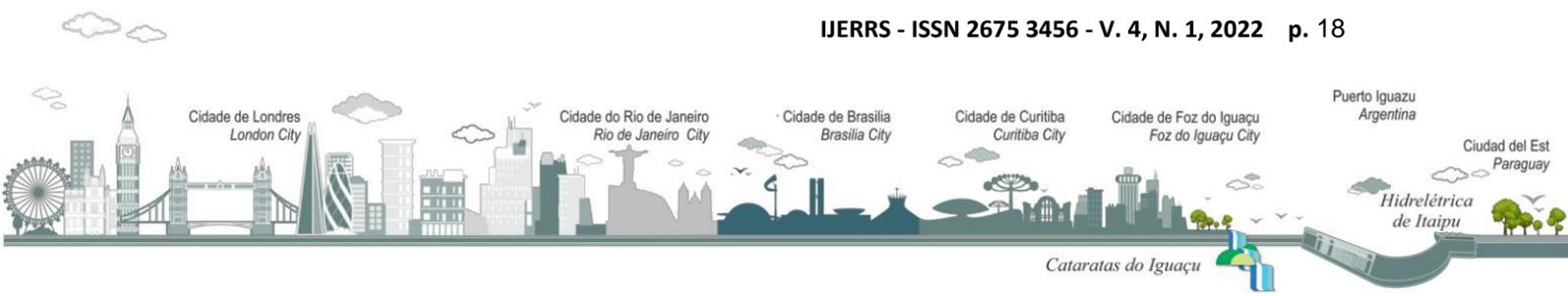


Fonte: os autores.

Figura 7 – Temperatura do solo para os pontos 1 e 2 sob análise, utilizando resultados NDBI.



Fonte: autores

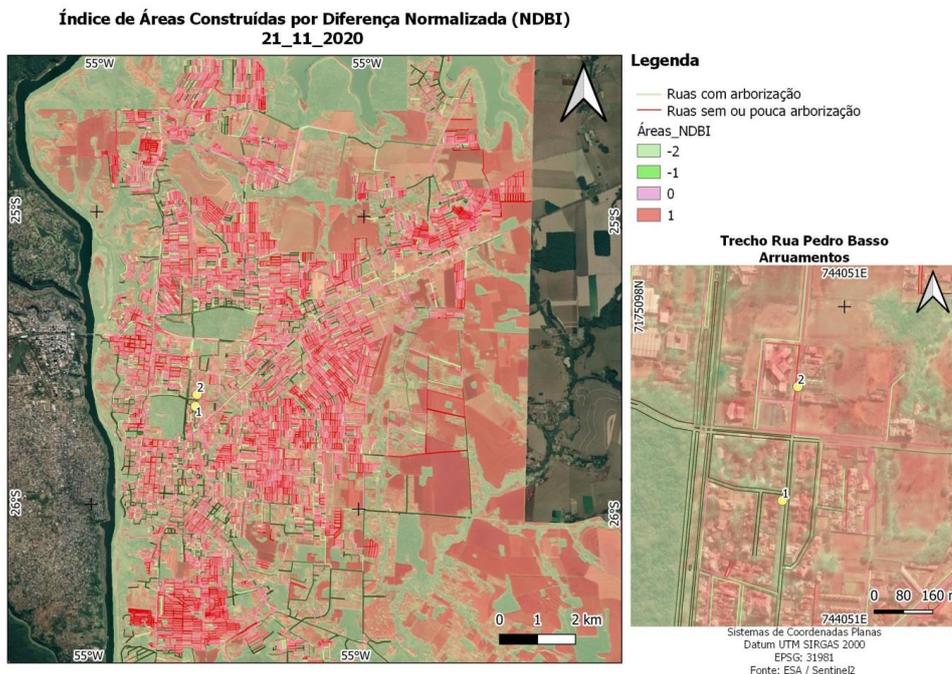




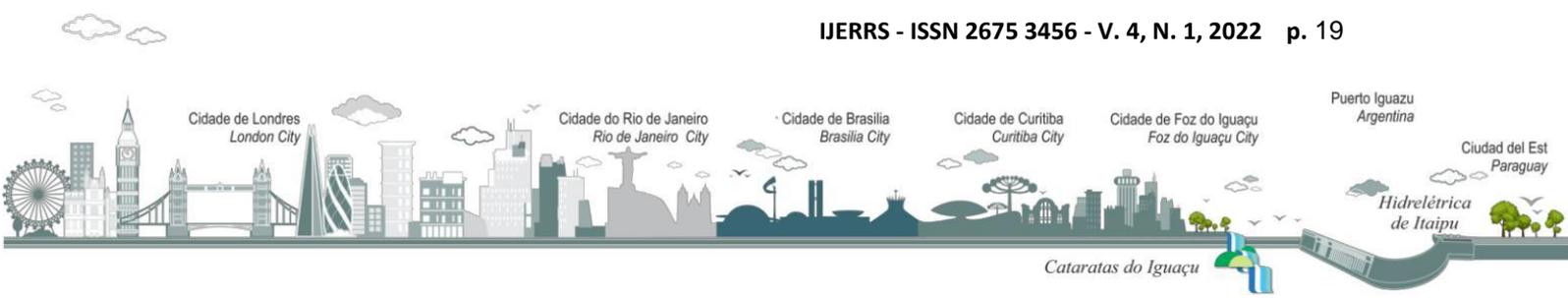
O mapa de NDBI (Figura 8) permite observar, a proporção de área exposta e/ou construída em relação à arborização urbana vista no mapa de NDVI. Este dado auxilia também na confirmação da observação de maiores temperaturas associadas à falta de arborização urbana, pois também se sobrepõe áreas de urbanização consolidada e sem árvores aos valores mais elevados de temperatura obtidos.

A extração dos valores *raster* (entre -2 e 1) do NDBI para os arruamentos da cidade contribuiu para evidenciar a forte presença de área construída nos segmentos de ruas que perfazem o sítio urbano de Foz do Iguaçu (PR). Se comparado novamente aos valores de temperatura obtidos, percebe-se que a ausência de árvores nos bairros com urbanização consolidada determina as temperaturas observadas no trecho pesquisado. A variação de cores dos arruamentos convertidos segue os valores de NDBI, pois expressam os valores matriciais obtidos com a elaboração do mapa.

Figura 8 – Resultados de índices de área construída para os pontos 1 e 2 sob análise, utilizando resultados do NDBI e arruamentos.



Fonte: autores



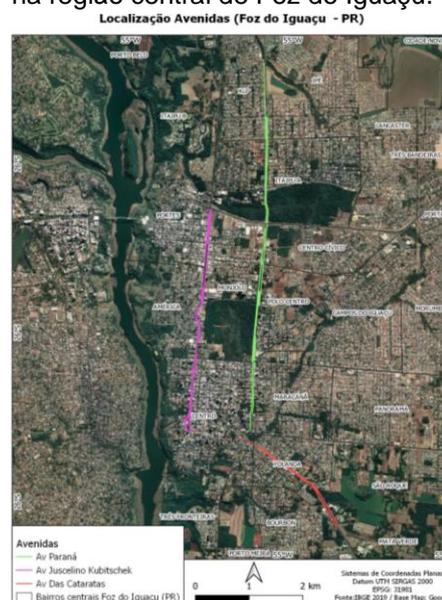


Cabe ressaltar que os valores mais próximos de 1 neste índice, indica as áreas do sítio urbano de Foz de Iguaçu (PR), que apresentam maior área construída, ou seja, menor presença de árvores ou componentes vegetais.

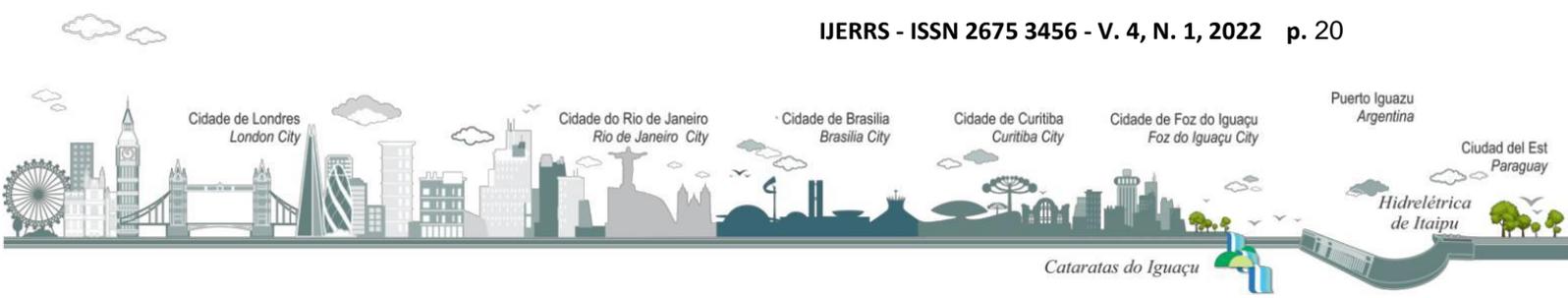
Extrapolção matemática de emissões e consumo de gasolina para Foz do Iguaçu

A composição das imagens das Figuras 6, 7 e 8, bem como a análise dos respectivos coeficientes NDBI e NDVI, permitiu fazer uma projeção do número de vagas de estacionamento sem arborização na região central de Foz do Iguaçu. É este tipo de vaga sem arborização que vão causar um aumento na temperatura interna do veículo, induzindo mais trabalho do ar-condicionado, maior consumo de gasolina, emissão de CO₂ e custos em R\$, conforme mostrado nas Figuras 3, 4, 5. Para efeitos de cálculo do número de vagas de estacionamento, considerou-se a distância de 5 metros entre cada veículo, o que proporciona também uma margem de espaço para manobras de entrada e saída ao estacionar o veículo. A Figura 9 mostra a região de interesse para o cálculo de número de vagas na região central de Foz do Iguaçu, delimitada pelas vias: Avenida Paraná (verde), Avenida Juscelino Kubitschek (rosa) e Avenida das Cataratas (vermelho).

Figura 9 – Indicação de avenidas de interesse para cálculo do número de vagas de estacionamento na região central de Foz do Iguaçu.



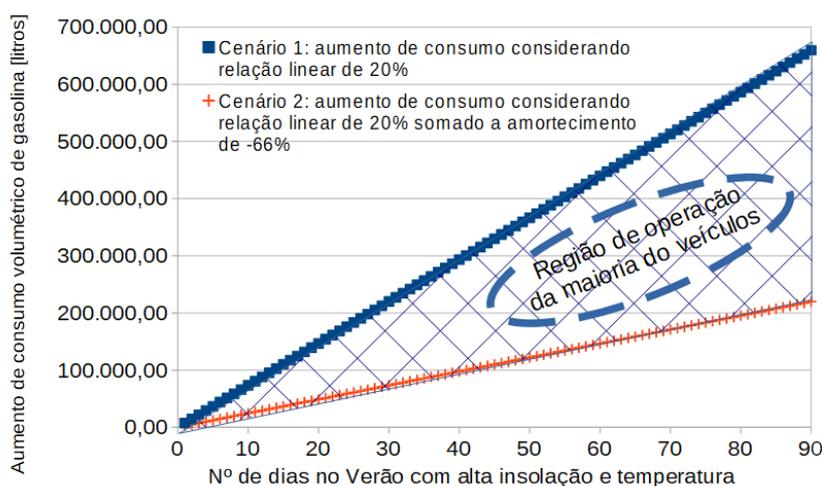
Fonte: autores





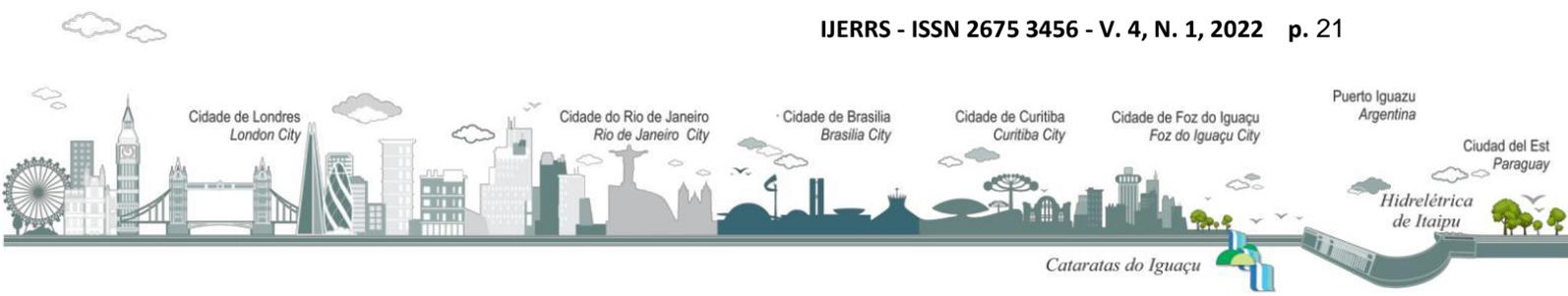
Com base na delimitação espacial mostrada na figura 9 foram identificadas 1545 vagas de estacionamento sem arborização na região central de Foz do Iguaçu. Para avaliar o efeito no consumo de combustível, emissão de CO₂ e gastos com combustíveis, os resultados mostrados nas Figuras 3, 4 e 5 para um carro individual foram multiplicados pelo número total de vagas sem arborização (1545). Este resultado mostra o pior cenário, onde todas as vagas sem arborização estariam ocupadas durante os dias de verão, causando um grande aumento de consumo de gasolina, emissão de CO₂ e gastos com combustíveis. A Figura 10 mostra a projeção de aumento do consumo volumétrico de gasolina em Foz do Iguaçu, considerando as vagas de estacionamento sem arborização na região central da cidade.

Figura 10 – Cenários de aumento de consumo volumétrico de gasolina causado pelo uso de ar-condicionado e pelo aumento de insolação devido à falta de arborização. A região hachurada entre os cenários 1 e 2 corresponde a região de operação para a maioria dos veículos que circulam na cidade. Resultados calculados para a região central de Foz do Iguaçu.



Fonte: os autores.

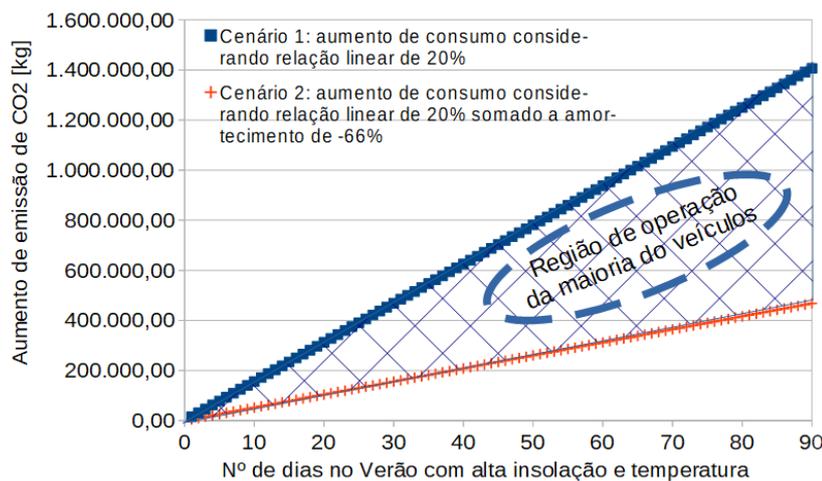
É interessante observar na figura 10 que as vagas de estacionamento sem arborização no centro de Foz do Iguaçu podem causar um aumento de aproximadamente 700 mil litros de gasolina relacionados com o consumo adicional do ar condicionado no verão, e que se forem consideradas as outras estações do ano este valor pode ser ainda mais elevado. É importante





saber também, que segundo a Agencia Nacional de Petróleo, foram consumidos quase 57 milhões de litros (56.397.361) de gasolina em Foz do Iguaçu no ano de 2019. Assim, o aumento de consumo de gasolina no verão causado pela falta de arborização fica em torno de 1,2% do consumo total de gasolina na cidade. Já a figura 11 mostra a projeção de aumento de emissões de CO₂ em Foz do Iguaçu, considerando as vagas de estacionamento sem arborização na região central da cidade.

Figura 11 – Cenários de aumento de emissão de CO₂ causado pelo uso de ar condicionado e pelo aumento de insolação devido à falta de arborização. A região hachurada entre os cenários 1 e 2 corresponde a região de operação para a maioria dos veículos que circulam na cidade. Resultados calculados para a região central de Foz do Iguaçu.



Fonte: os autores.

Pode-se observar na Figura 11 que as vagas de estacionamento sem arborização no centro de Foz do Iguaçu podem causar um aumento de aproximadamente 1.440 toneladas de CO₂ emitidas na atmosfera por ano, relacionado com o consumo adicional de combustível devido ao ar condicionado no verão, e que se forem consideradas as outras estações do ano este valor pode ser ainda mais elevado.

A Figura 12 mostra a projeção de aumento de custos com gasolina, em R\$, em Foz do Iguaçu, considerando as vagas de estacionamento sem arborização na região central da cidade.

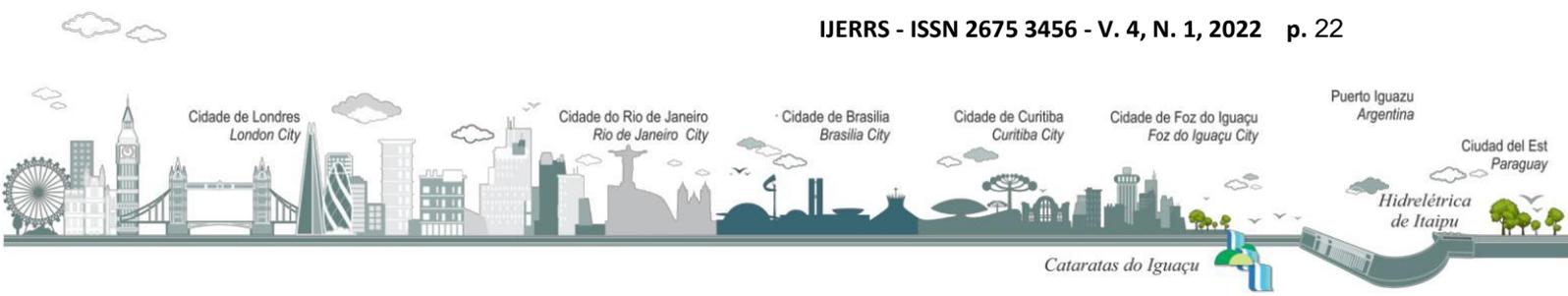
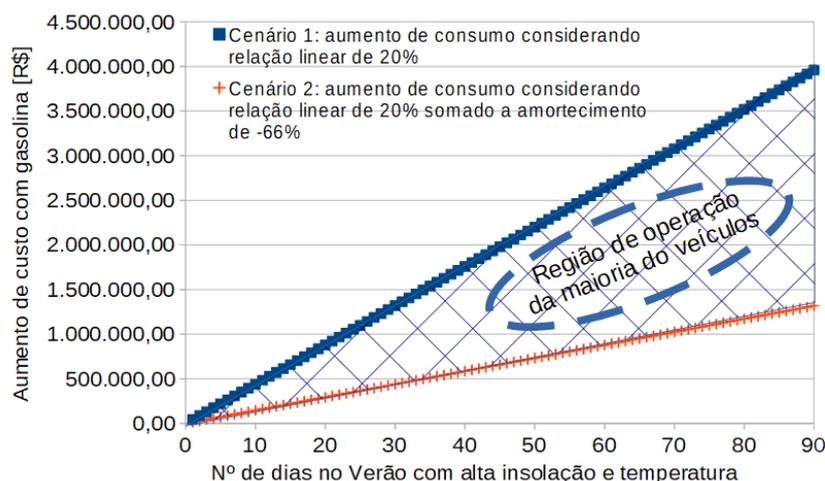




Figura 12 – Cenários de aumento de custos com gasolina causado pelo uso de ar condicionado e pelo aumento de insolação devido à falta de arborização. A região hachurada entre os cenários 1 e 2 corresponde a região de operação para a maioria dos veículos que circulam na cidade. Resultados calculados para a região central de Foz do Iguaçu

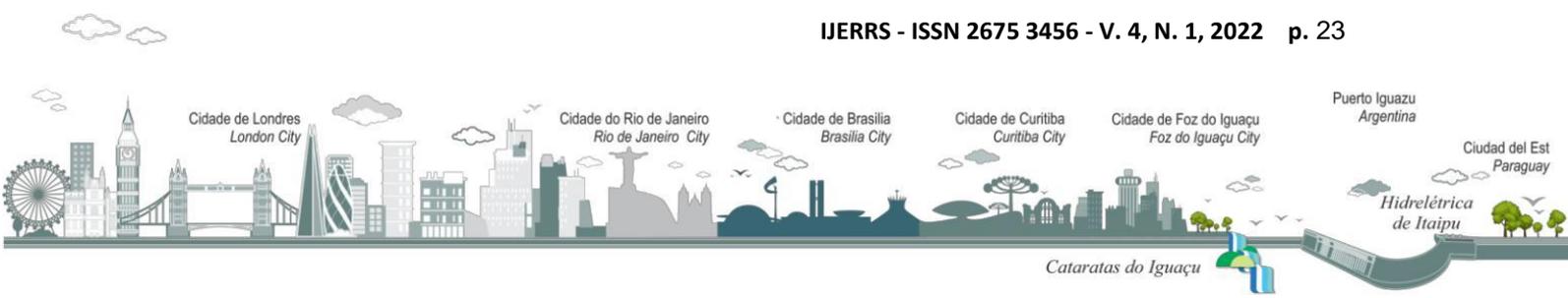


Fonte: os autores.

Pode-se observar na Figura 12 que as vagas de estacionamento sem arborização no centro de Foz do Iguaçu podem causar um aumento de custos com combustível em aproximadamente 4 milhões de Reais por ano, relacionado com o consumo adicional de combustível devido ao ar-condicionado no verão, e que se forem consideradas as outras estações do ano este valor pode ser ainda mais elevado. Embora este valor seja desembolsado individualmente por cada proprietário dos veículos que estacionam nas vagas sem sombreamento, este valor é importante para fornecer um valor de referência do impacto econômico que a falta de arborização pode induzir em uma cidade de porte médio como Foz do Iguaçu.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentada neste trabalho uma metodologia para cálculo e avaliação do impacto que a falta de arborização em vias urbanas pode causar no aumento de consumo de combustível gasolina, emissões de CO₂ e custos com gastos de combustíveis em cidades médias como Foz do Iguaçu no Paraná. Foram apresentadas as formulações teóricas sobre



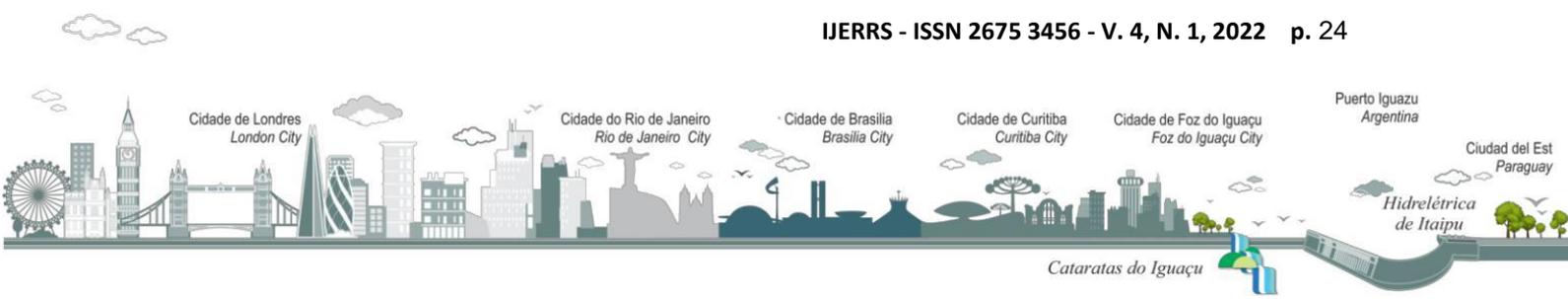


condicionamento de ar, consumo de gasolina e emissões de CO₂ em veículos do ciclo Otto. Foi mostrado também, como calcular os índices de arborização e temperatura de vias urbanas utilizando geoprocessamento, aplicando os índices NDVI e NDBI.

Foram realizados experimentos com monitoramento de temperatura externa e interna de um veículo sedã médio 2.0, mostrando que a falta de arborização causa um aumento médio de temperatura interna de 28,66° C nos dias de verão em Foz do Iguaçu. Este aumento de temperatura, considerando que se calculou em 1545 o número de vagas de estacionamento sem arborização na região central de Foz do Iguaçu, pode resultar em um aumento anual de consumo de 700 mil litros de gasolina, emissão de 1.400 toneladas de CO₂ e custos adicionais de até 4 milhões de R\$, custos estes que poderiam ser utilizados em ações ambientais e de sustentabilidade, como por exemplo, melhoria da arborização e vias urbanas na cidade de Foz do Iguaçu.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. J. P.; GUIMARÃES JR., S. A. M.; ANDRADE, E. L.; FERREIRA NETO, J. V. **Relação entre o Índice de Vegetação e a temperatura de superfície na estimativa e identificação das ilhas de calor na cidade de Maceió-AL.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17, Anais...2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Base de Faces de Logradouros do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- COELHO A; CORREA, W.S.C. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31-45, 2013.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** Porto Alegre: McGrawHill Bookmann, 2013.
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J.B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo.** São José dos Campos: WE/MCT, 1992. 132p.
- GONÇALVES DIAS, I. de L. **Análise Experimental da Influência do Ar-Condicionado Automotivo nas Emissões e no Consumo de Combustível em Veículos Leves Considerando o Ciclo Urbano (FTP-75).** 84 f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- HAN, T.; HUANG, L. **A Model for Relating a Thermal Comfort Scale to EHT Comfort Index.** In: SAE 2004 World Congress & Exhibition, 2004. Anais... 2004. DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-0919>.
- KUMAR, R. Sustainability of Automobile Air-Conditioning System Using Refrigerant R1234yf Instead of R134a. **International Journal of Automotive Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2015.
- LONDE, P. R.; MENDES, P. C. A influência das áreas verdes na qualidade de vida urbana. **Hygeia -**





Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v. 10, n. 18, p. 264-272, 25 jul. 2014.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* **Global warming of 1.5°C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change.** Estado Unidos: IPCC, 2021

ORHAN, O.; EKERCIN, S.; DADASER-CELIK, F. Use of Landsat Land Surface Temperature and Vegetation Indices for Monitoring Drought in the Salt Lake Basin Area, Turkey. **The Scientific World Journal**, New York, v. 20 n. 1, p. 1-11, 2014.

SILVA, R. de O. **Projeto, Construção e Análise de uma Bancada para Verificação de Parâmetros de Desempenho de um Sistema de Ar-Condicionado Veicular.** 291 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion.** 3.ed. New York: McGraw Hill, 2012.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. **Rem Sens Environ**, v. 8, n. 1, p. 127-50, 1979.

ZHA Y.; GAO, J. N. I S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003.
DOI: 10.1080/01431160304987

