

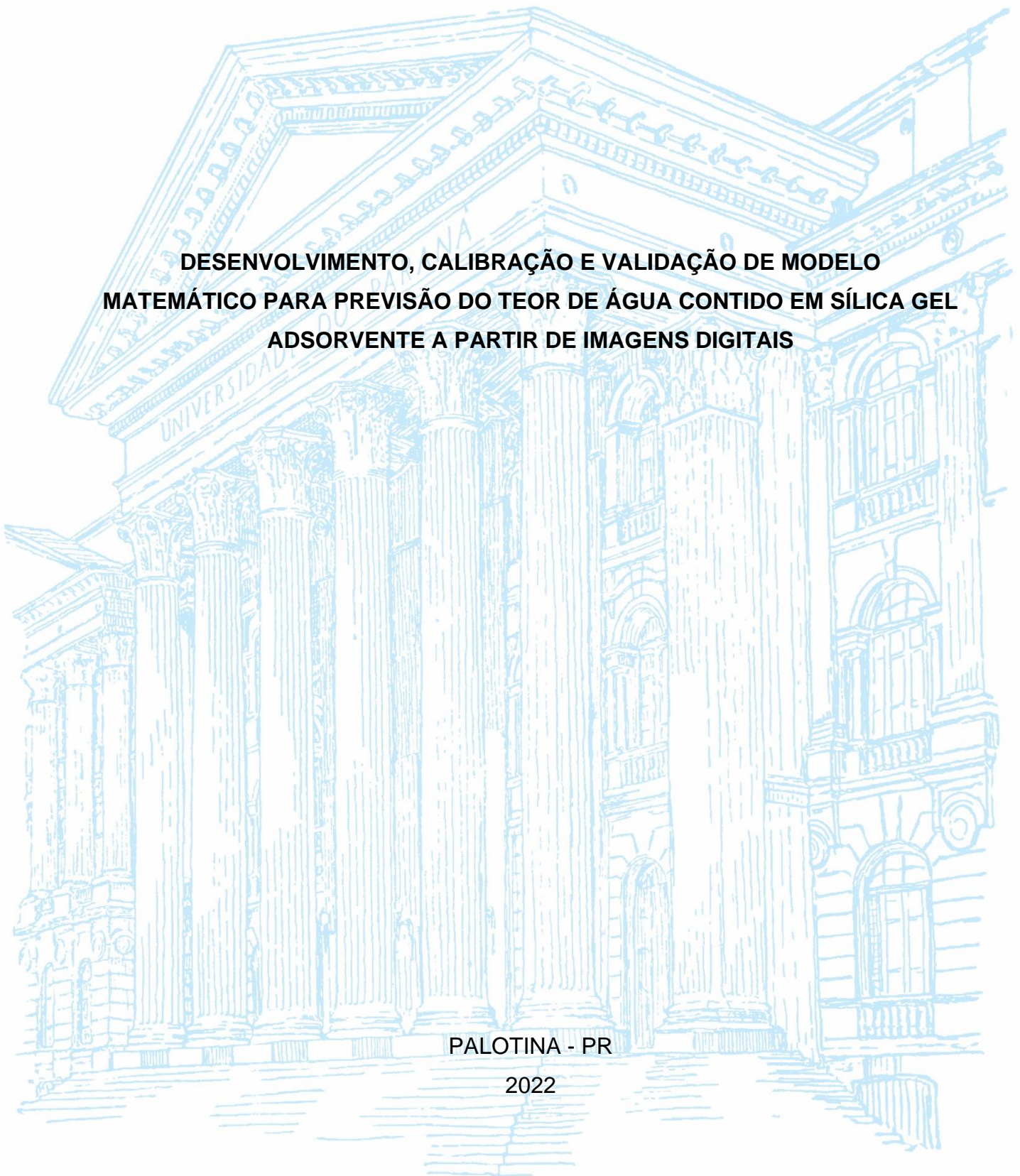
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO DOS SANTOS POSSAMAI

**DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO
MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DO TEOR DE ÁGUA CONTIDO EM SÍLICA GEL
ADSORVENTE A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS**

PALOTINA - PR

2022



EDUARDO DOS SANTOS POSSAMAI

**DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO
MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DO TEOR DE ÁGUA CONTIDO EM SÍLICA GEL
ADSORVENTE A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura em Ciência Exatas, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sequinel

PALOTINA - PR

2022

TERMO DE APROVAÇÃO

EDUARDO DOS SANTOS POSSAMAI

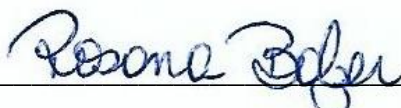
DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELO
MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DO TEOR DE ÁGUA EM SÍLICA GEL
ADSORVENTE A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências Exatas na Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título em Licenciatura em Ciências Exatas com habilitação em Química, aprovado pela seguinte banca avaliadora:



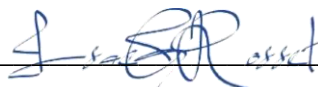
Prof. Dr. Rodrigo Sequinel

Orientador – Departamento de Engenharia e Exatas
Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina



Prof. Dra. Rosana Balzer

Membro da banca escrita – Departamento de Engenharia e Exatas
Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina



Prof. Dr. Isac George Rosset

Membro da banca escrita – Departamento de Engenharia e Exatas
Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina

Palotina, 09 de maio de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família, principalmente minha mãe por sempre estar acreditando e me incentivando a não desistir dos meus sonhos.

A todos os professores que estiveram comigo nesta jornada do curso de Licenciatura em Ciências Exatas, em especial meu orientador e amigo Rodrigo Sequinel, por todos os conselhos e conhecimentos que me tornaram um ser humano melhor.

A todos os técnicos de laboratório da UFPR setor Palotina, em especial o técnico Guilherme Lenz que estava sempre à disposição para auxiliar, seja com práticas experimentais ou com o nosso projeto de Iniciação Científica.

Aos grandes amigos João Vitor Ferreira e Juliano Passaretti Filho, membros fundamentais do projeto descrito neste trabalho.

E por fim agradecer a minha companheira Hanna por sempre me fazer feliz, me ouvir e me auxiliar.

Obrigado a todos!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático para previsão do teor de água contido em sílica gel adsorvente a partir de imagens digitais, visando também sua aplicação na determinação da umidade relativa do ar. A sílica gel adsorvente impregnada com íons tetraclorocobalto (II) além de ser uma excelente adsorvente de umidade, pode ser utilizada também como um sensor colorimétrico para previsão de umidade relativa do ar, ao agregar umidade do ambiente e alterar sua cor por meio de uma reação química. Para isso, utilizou-se imagens digitais juntamente com a análise de variáveis do modelo de cores RGB e regressões lineares. O modelo matemático desenvolvido por este trabalho apresentou resultados precisos, com um erro relativamente baixo quando comparado a sensores elétricos convencionais. Podendo ser utilizado como uma possível forma de realizar leituras de umidade relativa do ar em ambientes hostis para sensores elétricos.

Palavras-chave: Sílica gel adsorvente; Imagens digitais; Quimiometria.

ABSTRACT

This work aimed to develop a mathematical model to predict the water content contained in adsorbent silica gel from digital images, aiming also its application in the determination of the relative humidity of air. The adsorbent silica gel impregnated with tetrachlorocobalt(II) ions, besides being an excellent adsorbent of moisture, can also be used as a colorimetric sensor to predict the relative humidity of air, by adding moisture from the environment and changing its color through a chemical reaction. For this, digital images were used along with variable analysis of the RGB color model and linear regressions. The mathematical model developed by this work showed accurate results, with a relatively low error when compared to conventional electrical sensors. It can be used as a possible way to perform relative humidity readings in environments hostile to electrical sensors.

Keywords: Adsorbent sílica gel; Digital Images; Chemometrics.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: DADOS PLOTADOS (ΔG x nº DE IMAGENS) PARA CADA CONDIÇÃO DE %U.R.....	26
GRÁFICO 2: RELAÇÃO MATEMÁTICA DE REGRESSÃO PARA O MODELO MATEMÁTICO (INCLINAÇÃO DA RETA X %U.R).....	27
GRÁFICO 3: DADOS DOS TESTES PLOTADOS (ΔG x nº DE IMAGENS).....	29

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1: PROTÓTIPO MK1	17
ILUSTRAÇÃO 2: RASPBERRY PI 3, SOFTWARE DE AQUISIÇÃO	18
ILUSTRAÇÃO 3: PORÇÕES DE SÍLICA GEL.....	18
ILUSTRAÇÃO 4: BANHO TERMOSTATIZADO	19
ILUSTRAÇÃO 5: VARIAÇÃO DA %U.R EM TEMPERATURA CONSTANTE	24
ILUSTRAÇÃO 6: VARIAÇÃO DA %U.R EM TEMPERATURAS DIFERENTES	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MÉDIAS DE TEMPERATURAS	23
TABELA 2: INCLINAÇÃO DA RETA PARA CADA CONDIÇÃO DE %U.R	27
TABELA 3: FATORES DE CORREÇÃO PARA OS TESTES EM CAMPO	28
TABELA 4: MÉDIAS DE %U.R DOS TESTES EM CAMPO	28
TABELA 5: PREVISÃO DE %U.R PARA OS TESTES EM CAMPO	29
TABELA 6: ERRO RELATIVO ENTRE OS SENSORES	30

LISTA DE ABREVIATURAS

%U.R - % de Umidade Relativa

RGB – *Red, Green, Blue*

LDA – *Linear Discriminant Analysis*

PLS-DA – *Partial Least Squares*

SPA – *Successive Projections Algorithm*

MDF – *Medium Density Fiberboard*

GB – *Gigabyte*

g – Gramas

°C – Graus Celsius

mL/min – Mililitros por minuto

.txt – Arquivo de texto

G – *Green*

n^o - Número

R² - Coeficiente de determinação

MK1 – Nome dado ao protótipo

Pa – Pascal

kPa – Quilo Pascal

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ - Delta

ΔG - Delta *green*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.	MATERIAIS.....	17
3.1	PROTÓTIPO DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS	17
3.2	SISTEMA DE CONTROLE DA UMIDADE	19
4.	MÉTODOS	20
4.1	TEMPERATURA DO BANHO TERMOSTATIZADO	20
4.2	AQUISIÇÃO DAS IMAGENS	21
4.3	TRATAMENTO DAS IMAGENS	22
4.4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO	22
4.5	TESTE EM CAMPO DO MODELO MATEMÁTICO	23
4.6	FATOR DE CORREÇÃO PARA O MODELO MATEMÁTICO.....	23
4.7	CÁLCULO DA % DE ERRO RELATIVO	25
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	MODELO MATEMÁTICO.....	27
5.2	FATOR DE CORREÇÃO	28
5.3	TESTE EM CAMPO DO MODELO MATEMÁTICO	28
6.	CONCLUSÃO.....	30
7.	REFERÊNCIAS.....	31

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da ciência e a facilidade ao acesso a informações, alguns estudos vêm ganhando espaço no campo da pesquisa, e um deles é a umidade relativa do ar (%U.R). A umidade relativa do ar descontrolada em certos ambientes do setor de produção pode favorecer o desenvolvimento de parasitas e fungos, ou mesmo comprometer a qualidade de vida do animal, por exemplo os aviários de frango, conseqüentemente afetando o rendimento final da produção (PONCIANO, 2011).

Não só nos setores de produção, mas também a umidade relativa do ar pode ocasionar danos ou percas no setor siderúrgico, uma vez que é considerada um fator comprometedor que pode impedir a produção, danificar ou inutilizar certos tipos de métodos, materiais ou metais mal armazenados (SILVA, 2011). Portanto para averiguar a %U.R, algumas industrias, sejam elas siderúrgicas ou do setor de produção podem utilizar dados obtidos através de sensores elétricos, como por exemplo o termo higrômetro.

Porém, em alguns casos os sensores elétricos de termo higrômetros, acabam por não exercer sua principal função, ou mesmo, acabam sendo inutilizados por avarias, devido às condições severas que alguns climas e ambientes proporcionam. Com isso, este trabalho apresenta o desenvolvimento do modelo matemático para um sensor físico-químico/colorimétrico que utiliza a sílica gel adsorvente impregnada com tetraclorocobalto (II) para medir a umidade relativa do ar, podendo ser utilizado como um possível substituto para os sensores elétricos.

O processo de resposta para o modelo foi baseado na mudança de cor da sílica gel adsorvente ao adsorver água presente no ambiente. Com isso criou-se um modelo matemático para previsão da umidade relativa do ar, utilizando variáveis presentes nas matrizes de cores RGB, obtidas através de imagens digitais da sílica gel adsorvente, na qual as imagens foram obtidas através de uma webcam convencional. O modelo desenvolvido passou por uma avaliação de parâmetros de precisão e qualidade, e em seguida foi testado na determinação da umidade relativa do ar em três ambientes distintos.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático para previsão do teor de água contido em sílica gel adsorvente a partir de imagens digitais, e sua aplicação na determinação da umidade relativa do ar.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar o melhor sinal analítico no modelo de cores RGB e relacionar a intensidade de cor com o teor de água adsorvido.

Calibrar o modelo de aquisição de imagens a partir de imagens relacionadas à intensidade de cor da sílica gel adsorvente.

Determinar os parâmetros de qualidade do modelo, tais como, linearidade e parâmetros de regressão, precisão, desvio/erro relativo de medidas.

Realizar análises em campo a fim de testar o modelo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Trabalhos dentro do campo de análise de imagens digitais vêm sendo empregados dentro da Química Analítica, esses tendo como objetivo prever algum fenômeno físico-químico ou a qualidade de algum produto. Com isso Lupetti et al. 2005 utiliza a análise de imagens digitais e desenvolve métodos para prever e tomar ações de prevenção em relação ao escurecimento de tecidos vegetais. Neste trabalho uma determinada fruta é exposta a um ambiente com temperaturas elevadas, e em determinados intervalos de tempo são realizadas capturas de imagens para que posteriormente essas imagens sejam tratadas e analisadas por meio de softwares utilizando métodos e modelos matemáticos.

Por isso, os autores deste trabalho verificam que uma das principais formas de se avaliar o grau de deterioração de alimentos é através de técnicas de análise de imagens, que visam quantificar alterações de coloração ao longo do tempo. Existem na literatura diversos procedimentos para análise de imagens, que são obtidas com câmera ou webcam, e analisadas em computadores ou microcomputadores através de programas que calculam todos os elementos gráficos das imagens ("pixels"), permitindo diferenciar padrões, por exemplo: claro e escuro, tons de cinza ou alguma

coloração específica, e com isso obter relações numéricas entre estes padrões. (LUPETTI, 2005).

Em outro trabalho Morais utilizou imagens digitais na análise de solos, na Universidade Federal de Goiás - UFG em parceria com a Embrapa. Neste trabalho foram propostas metodologias para determinação da textura do solo através de imagens digitais combinadas com métodos quimiométricos de calibração multivariada. Essas metodologias são avaliadas e comparadas com os métodos clássicos quanto a precisão, exatidão, operacionalidade, geração de resíduos e custo benefício. Desta forma, o autor deste trabalho propõe a utilização de análise multivariada de imagens digitais para previsão da textura do solo e classificação do mesmo. Para isso, 60 amostras de solos diferentes foram consideradas para análise textural pelo método da pipeta e para obtenção de imagens digitais no sistema de cores RGB (Red, Green, Blue).

A correlação entre as imagens digitais e os teores de areia, argila e silte foi feita por Regressão por Quadrados Mínimos Parciais (PLS) e por Regressão Linear Múltipla associada com o Algoritmo das Projeções Sucessivas (SPA-RLM). Os melhores modelos apresentaram um índice de acerto de 100%. Portanto, a predição textural do solo através de imagens é uma técnica promissora por ser limpa, barata e operacional (MORAIS, 2016).

Ferst, 2018 propôs em seu trabalho um tratamento para remoção de poluentes de águas através da técnica de adsorção, utilizando para isso a sílica gel adsorvente, que foi reaproveitada. Em seu trabalho justifica que a presença de poluentes na forma de nitrato em águas pode causar riscos à saúde do ser humano, já que esse contaminante apresenta alta solubilidade, e os tratamentos convencionais não são capazes de removê-lo (FERST, 2018).

Gonçalves, 2015 utilizou em seu trabalho a aplicação de imagens digitais e a análise multivariada para classificação e determinação de parâmetros de qualidade para plumas de algodão. Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma nova metodologia analítica baseada no uso de imagens digitais e análise multivariada para a classificação de plumas de algodão com relação a variedade da mesma. Também determinou três importantes parâmetros de qualidade, sendo: grau de amarelamento (+b), reflectância (Rd) e teor de cera (WAX) (GONÇALVES, 2015).

Gonçalves, 2015 relata também em seu trabalho que o uso dos dados de imagens digitais juntamente com a análise multivariada, estabelece uma alternativa

para o desenvolvimento de métodos analíticos simples, rápidos, precisos, de baixo custo e capazes de realizar análises não destrutivas nas amostras. Um dos objetivos específicos deste trabalho foi o de aperfeiçoar o sistema para aquisição das imagens digitais, em termos de iluminação e configuração da câmera (GONÇALVES, 2015).

Passaretti Filho, 2015 desenvolveu métodos sensíveis, seletivos, de custo reduzido com potencial para serem utilizados em aplicações ambientais e tecnológicas para a determinação de nitrito, fosfato inorgânico e ozônio residual em água. Em seu trabalho utilizou para determinação destes analitos diferentes reações em solução aquosa, que nestas produziam espécies químicas coloridas, estas foram utilizadas como base de métodos colorimétricos, envolvendo a aquisição e o processamento de imagens digitais. Em seu trabalho foram comparados os sinais analíticos obtidos por espectrofotometria e imagens digitais, sendo que as diferentes determinações apresentaram resultados não discrepantes entre si, com índice de confiança de 95%. Passaretti Filho, 2015 afirma também que os resultados obtidos nos procedimentos que resultaram em dados confiáveis foram utilizados como base para que fossem estabelecidos novos métodos para aplicações ambientais, como a determinação de SO_2 e NO_2 atmosférico (PASSARETTI FILHO, 2015).

Passaretti Filho, 2015 justifica em seu trabalho que o processamento de imagens digitais é relativamente recente dentro da ciência, pois utiliza como método uma propriedade essencial às imagens: no qual por meio de modelos matemáticos ocorre sua transformação em uma matriz de dados, onde cada unidade desta matriz, chamado de "pixel", carrega informações relevantes sobre o material estudado.

Passaretti Filho, 2015 justifica também que é importante ter como uma alternativa ferramentas matemáticas, pois essas, de modo mais rigoroso, extraem um maior número de informações de um conjunto de imagens, interpretando-as de forma criteriosa dentro de modelos químicos qualitativos e quantitativos (PASSARETTI FILHO, 2015).

3. MATERIAIS

3.1 PROTÓTIPO DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

Para aquisição das imagens foi construída por Ferreira (2021) uma caixa em madeira MDF, projetada para não haver interferência de iluminação externa na hora da aquisição das imagens. Possuía iluminação interna de led de cor 6500 Kelvin, espaço para acoplar uma webcam, espaço interno quadrado para armazenamento das amostras de sílica gel adsorvente e duas válvulas, sendo uma de escape e outra para entrada de ar.

ILUSTRAÇÃO 1: PROTÓTIPO MK1



FONTE: O autor (2021)

Foi utilizada uma webcam convencional da marca *Logitech*, modelo C920 para capturar as imagens, e para armazená-las foi utilizado um *Raspberry Pi 3* e um cartão de memória de 32GB de capacidade.

O programa para aquisição das imagens e automação do procedimento foi desenvolvido pelo pesquisador e colaborador Juliano Passaretti Filho (Colaborador do Projeto). Nesta etapa foram otimizadas as condições da câmera e a conexão entre a webcam e o *Raspberry Pi 3*. Neste mesmo sentido, também foi automatizado o recorte quadrado das imagens, mantendo-se sempre um padrão de brilho, foco, saturação e iluminação dentro do protótipo.

ILUSTRAÇÃO 2: RASPBERRY PI 3, SOFTWARE DE AQUISIÇÃO



FONTE: O autor (2021)

O software utilizado para coletar informações a respeito das matrizes de cores RGB das imagens foi o software livre *ImageJ*.

A sílica gel adsorvente utilizada para aquisição das imagens foi a da marca *Synth*, e era impregnada com íons de tetraclorocobalto (II) $(\text{CoCl}_4)^{2-}$. Como a sílica gel adsorvente vem muito seca e muito azul, toda a quantidade de sílica contida no recipiente inicial foi deixada exposta ao ambiente em uma bandeja para agregar umidade pela primeira vez. Posteriormente foi colocado para secar em estufa a 120°C por no mínimo 24 horas. As porções de sílica gel adsorvente eram separadas em amostras de 10g por béquer antes de entrar na estufa, e após saírem eram mantidas em um dessecador fixo para que não agregasse umidade externa.

A reação química do íon tetraclorocobalto (II) $(\text{CoCl}_4)^{2-}$ de coloração azul anil, quando hidratado com água (H_2O), é uma reação de complexação dos íons de tetraclorocobalto (II), formando o íon hexaaquocobalto (II) $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ e tornando-se rosa.

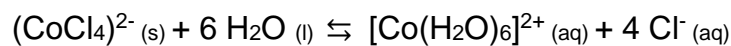


ILUSTRAÇÃO 3: PORÇÕES DE SÍLICA GEL



FONTE: O autor (2019)

3.2 SISTEMA DE CONTROLE DA UMIDADE

Para se ter o controle da umidade dentro do protótipo MK1, foi utilizado um sistema de passagem de ar por coluna de água, com saída para um condensador acoplado a um banho termostatizado para controle exato da temperatura.

Para passagem de ar pelo sistema foi utilizada uma bomba compressora de aquário convencional, com a finalidade de borbulhar ar atmosférico dentro de um kitassato contendo água, a uma vazão aproximada de 800 a 900 mL/min (aferida com bolhometro). Esse ar 100% umedecido (saturado) era direcionado para a parte superior interna de um condensador do tipo reto, posicionado na vertical. O controle de umidade do ar circulante pelo sistema era dado pela temperatura do condensador, tendo como base uma relação próxima entre o ponto de orvalho e umidade relativa, expressa pela equação derivada da equação de Tetens.

O ar com a umidade desejada saía do condensador e passava por um sensor de temperatura do ar e %U.R, construído com placas de Arduino pelo pesquisador e colaborador Juliano Passaretti Filho, utilizado como referência inicial para ajuste do sistema. Posteriormente o ar era inserido através da válvula acoplada na parte superior do protótipo MK1, com saída livre para o ambiente com a válvula de escape acoplada na parte inferior do protótipo.

ILUSTRAÇÃO 4: BANHO TERMOSTATIZADO



FONTE: O autor (2021)

4. MÉTODOS

4.1 TEMPERATURA DO BANHO TERMOSTATIZADO

A temperatura a ser inserida no banho termostatizado estava diretamente relacionada com as condições climáticas do dia em que seriam adquiridas as imagens. Pois, utilizava-se a temperatura do ambiente para calcular o ponto de orvalho naquelas condições.

Para estipular a temperatura do banho termostatizado utilizava-se uma equação derivada da equação de Tetens. A equação de Tetens nos diz que a pressão parcial do vapor d'água em determinada temperatura, tem um determinado valor de pressão, medido em Quilo Pascal (kPa).

EQUAÇÃO 1: EQUAÇÃO DE TETENS

$$e_s = A \cdot 10^{\frac{7,5t}{237,3+t}}$$

Onde:

e_s = Pressão de vapor

A = constante psicrométrica (0,6108 kPa)

t = Temperatura do ambiente

Já a equação para estipular a temperatura do banho termostatizado é dada pela Equação 2, que neste caso seria a mesma temperatura do ponto de orvalho (t_d). A equação 2 diz respeito à relação entre o ponto de orvalho e a umidade relativa do ar (LAWRENCE, 2005).

EQUAÇÃO 2: EQUAÇÃO DERIVADA DA EQUAÇÃO 1

$$t_d = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}{A_1 - \ln \left(\frac{RH}{100} \right) - \frac{A_1 t}{B_1 + t}}$$

Onde:

t_d = Temperatura do ponto de orvalho

B_1 = Coeficiente B_1 (243,04 °C)

A_1 = Coeficiente A_1 (17,625)

\ln = Logaritmo natural

RH = Umidade relativa do ar

t = Temperatura do ar em °C

Tal equação foi utilizada para gerar as condições específicas de umidade dentro do protótipo MK1. Por exemplo, para atingir 12% de umidade relativa do ar em um dia com a temperatura média de 22°C, a temperatura do banho foi ajustada em -8,73°C, pois nesta temperatura 88% da umidade do ar seria condensada, sobrando 12% de umidade no ar. As demais condições de umidade dentro do protótipo foram geradas da mesma forma, tendo como base sempre a temperatura do ar no dia de realização das aquisições, sendo que a média de temperatura dos dias foram próximas de 22 °C.

4.2 AQUISIÇÃO DAS IMAGENS

As aquisições foram realizadas em um total de 4 horas para cada umidade relativa a ser inserida no modelo. Sendo que, foram estudadas 7 umidades relativas, sendo elas: 0%, 12%, 30%, 45%, 60%, 75% e 100%. A aquisição das imagens foi realizada por meio de um software criado pelo pesquisador e colaborador Juliano Passaretti Filho. Este software criado foi inserido em um *Raspberry Pi 3*, que então era acionado por meio de um botão e iniciava-se a gravação em .txt da temperatura do ar, a %U.R e obtinha-se 1 imagem a cada 36 segundos por 14400 segundos (4

horas) totalizando 400 imagens para cada umidade relativa. O total de imagens para o banco de dados foi de 2800 imagens.

As 4 horas estipuladas para as aquisições foram determinadas em um estudo que relacionou a intensidade de mudança de cor x tempo de ensaio (nº de imagens). O critério de escolha foi a obtenção de melhor resposta (variação de cor) do modelo e com baixo erro relativo.

4.3 TRATAMENTO DAS IMAGENS

As imagens foram tratadas em um software computacional livre chamado *ImageJ*. Cada uma das imagens foi separada em canais de cores R, G e B. Dentre os 3 canais de cores foi selecionado o que apresentava melhor relação entre as imagens e a diferença nas intensidades de cores, neste caso foi selecionado o canal G (*Green*). O melhor canal foi utilizado na captação de todas as imagens. Cada grupo de 400 imagens obtidas correspondem a uma varredura de uma condição de umidade relativa, obtendo-se então 400 pontos de aquisição de intensidade de cor para cada uma das umidades estipuladas.

Em seguida, para cada umidade relativa os valores de intensidade de cor para o canal G foram importados, ajustados e organizados dentro de uma tabela no Excel. O ajuste feito na variável G foi tomado como a diferença (ΔG) de um valor menos o valor inicial, ocasionando uma diminuição dos ruídos para o modelo e melhor ajuste.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

As curvas de calibração para o desenvolvimento do modelo matemático foram plotadas graficamente os “ $\Delta G \times n^\circ$ Imagens” para cada condição de umidade relativa. Foi traçado a linha de tendência (regressão) para cada condição de umidade. Verificou-se também a inclinação para cada reta e seus respectivos R^2 . Visto que todos os R^2 ficaram acima de 0,98 observou-se um comportamento linear para a mudança de ΔG ao decorrer do tempo.

Para o desenvolvimento do modelo matemático final foram utilizadas as 7 inclinações da reta (0%, 12%, 30%, 45%, 60%, 75% e 100%). A partir disso,

foi plotado um gráfico de inclinação da reta x %U.R, que representa a relação matemática de calibração do modelo, com comportamento linear (R^2 0,9852).

4.5 TESTE EM CAMPO DO MODELO MATEMÁTICO

Após as etapas de desenvolvimento e calibração, foram selecionados 3 ambientes totalmente diferentes para testar o modelo matemático: Estufa de plantas daninhas, ambiente climatizado e um aviário de frangos.

Para realização de tais medidas de campo, foi levado o conjunto completo do protótipo MK1: Caixa de aquisição com câmera, *Raspberry Pi 3*, bomba de aquário, sensor de temperatura do ar e %U.R, e uma porção de 10g de sílica gel adsorvente previamente seca, e isolada do ambiente.

O protótipo foi sempre fixado em posição estável, livre de incidência direta de raios solares e chuva. Em todos ambientes uma porção de sílica gel adsorvente previamente seca foi inserida no porta amostra do MK1, imediatamente a caixa foi fechada e acionado o botão de início. Após 4 horas de aquisição de imagens o teste era finalizado, e as imagens eram posteriormente exportadas para um computador a fim de extrair dados analíticos e compará-los com o banco de dados do modelo matemático desenvolvido.

4.6 FATOR DE CORREÇÃO PARA O MODELO MATEMÁTICO

Nas condições de análise de campo, verificou-se que os dados obtidos na estufa, no ambiente climatizado e no aviário de frangos estavam todos com a temperatura do ambiente acima de 25 °C, bastante diferente em relação à condição de calibração realizada em laboratório, conforme a Tabela 1.

TABELA 1: MÉDIAS DE TEMPERATURAS

%U.R	0%	12%	30%	45%	60%	75%	100%	Modelo	Estufa	Climatizado	Aviário
Méd. T (°C)	18,65	22,29	20,97	20,42	22,08	23,47	23,08	21,57	28,18	27,07	26,70

FONTE: O autor (2022)

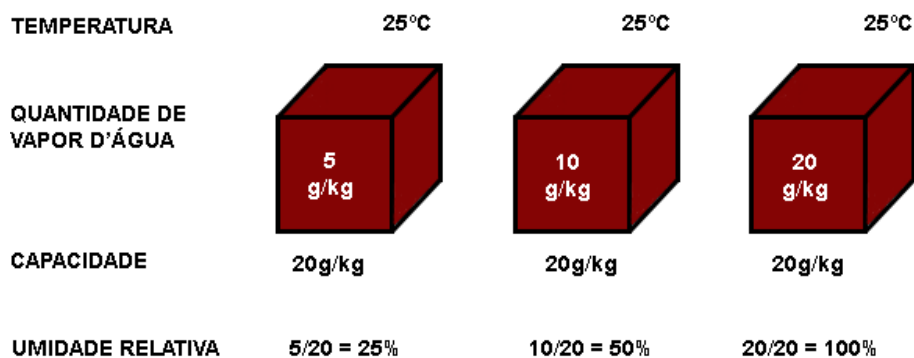
As temperaturas foram coletadas através do sensor de temperatura do ar e %U.R, que realizava medidas constantes de: 1 medida a cada 2 segundos.

Totalizando 7200 leituras de temperatura do ar e %U.R em 4 horas. Essas médias de temperatura das umidades relativas estudadas da Tabela 1 leva em conta os 7200 pontos coletados pelo sensor. Já a temperatura média do modelo, soma-se as médias de temperatura de cada umidade e divide por 7.

É importante ressaltar que a umidade relativa do ar não representa uma escala 1:1 com a quantidade de gases presentes no ar atmosférico. Isto é, se um ambiente possui umidade relativa de 95% isso não significa que o ar tem 95% de vapor d'água.

O vapor d'água presente no ar atmosférico varia entre 0 e 4%, ou seja, a escala de umidade relativa do ar varia de 0 a 100% e essa escala está inserida dentro desses 4%, ou seja, quando o ar atmosférico possui umidade relativa de 95% isso significa que provavelmente ele tenha 3,8% de vapor d'água, sem levar em consideração a temperatura do ambiente.

ILUSTRAÇÃO 5: VARIAÇÃO DA %U.R EM TEMPERATURA CONSTANTE



FONTE: MORAN, J. M.; MORGANN, M.D. (Adaptada pelo autor)

O ar atmosférico possui diferentes capacidades de armazenar vapor d'água, conforme a Ilustração 5 e 6, e isso está diretamente atrelado com a sua temperatura, por isso a temperatura do ambiente é importante para comparar os dados adquiridos em laboratório e os dados obtidos em campo.

ILUSTRAÇÃO 6: VARIAÇÃO DA %U.R EM TEMPERATURAS DIFERENTES

TEMPERATURA	20°C	10°C	0°C
QUANTIDADE DE VAPOR D'ÁGUA	3.5 g/kg	3.5 g/kg	3.5 g/kg
CAPACIDADE	14g/kg	7g/kg	3.5g/kg
UMIDADE RELATIVA	$3.5/14 = 25\%$	$3.5/7 = 25\%$	$3.5/3.5 = 100\%$

FONTE: MORAN, J. M.; MORGANN, M.D. (Adaptada pelo autor)

Por isso, necessitou-se de um fator de correção para as medidas realizadas em campo. O fator de correção nada mais é do que o quociente da pressão de vapor ($e_{s\text{ padrão}}$) na temperatura padrão do modelo, que foi de 21,57 °C pela pressão de vapor na temperatura do ambiente em questão ($e_{s\text{ ambiente}}$).

Este fator foi multiplicado pelas variáveis ΔG já normalizadas, e corrige os dados obtidos em temperaturas maiores ou menores do que a temperatura média do modelo.

4.7 CÁLCULO DA % DE ERRO RELATIVO

Para calcular o erro relativo entre as medidas das médias de %U.R medida pelo sensor elétrico x médias de %U.R calculada com base no modelo matemático, utilizou-se a seguinte equação:

EQUAÇÃO 3: EQUAÇÃO PARA CALCULAR %ERRO RELATIVO

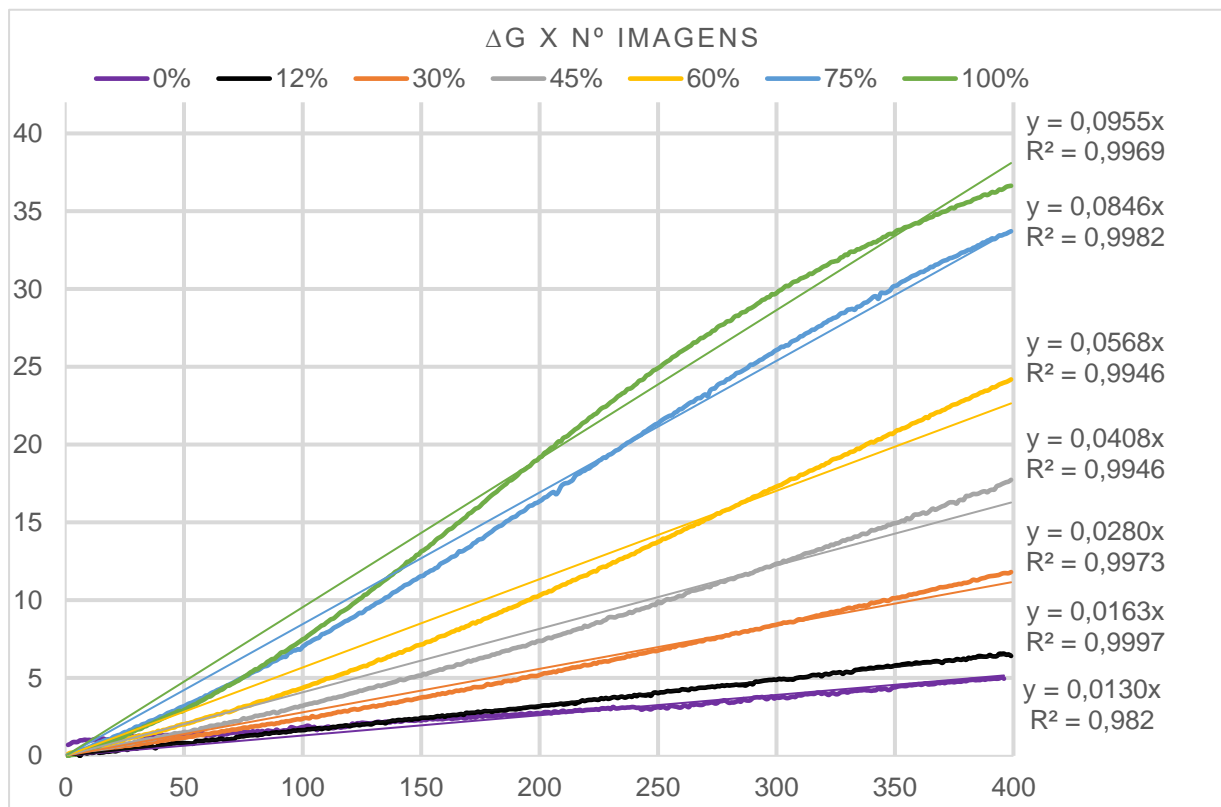
$$\%Erro = \frac{\%U.R \text{ (sensor elétrico)} - \%U.R \text{ (modelo matemático)}}{\%U.R \text{ (sensor elétrico)} \times 100}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sílica gel adsorvente impregnada com íons tetraclorocobalto (II), quando seca, parte sempre da coloração azul anil, com a tendência ao rosa/transparente, à medida que adsorve água do ambiente. Ao avaliar a evolução da mudança de cor no modelo de cores RGB, notou-se que as matrizes R (*Red*) e B (*Blue*) possuíam poucos dados analíticos a respeito da alteração de cor (sensor colorimétrico), tornando-se inadequadas para o estudo. Por isso, a variável que melhor explicou estes dados foi a matriz G (*Green*), a qual foi escolhida.

Com isso, ao plotar em um gráfico todos os valores de $\Delta G \times n^\circ$ de imagens obtém-se as respectivas retas e inclinações de reta para os valores de umidade estudados neste trabalho, conforme o Gráfico 1.

GRÁFICO 1: DADOS PLOTADOS ($\Delta G \times n^\circ$ DE IMAGENS) PARA CADA CONDIÇÃO DE %U.R



FONTE: O autor (2022)

Vale notar também a linearidade de todas as retas, seus respectivos R² estão acima de 0,98 indicando que a variação de cor da sílica gel adsorvente ao longo do tempo é linear.

5.1 MODELO MATEMÁTICO

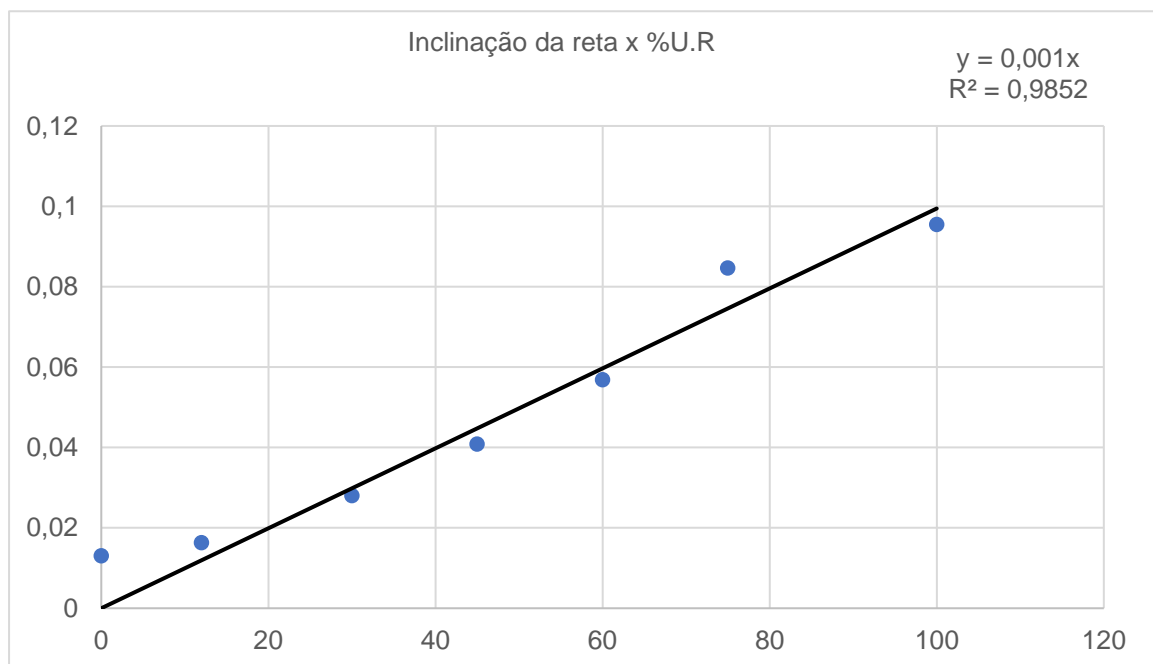
Para o desenvolvimento do modelo matemático utilizou-se todas as inclinações da reta e suas respectivas unidades relativas, conforme a Tabela 2. Posteriormente plotou-se essas inclinações x %U.R em um gráfico, sendo este, o gráfico do modelo matemático de calibração desenvolvido neste trabalho.

TABELA 2: INCLINAÇÃO DA RETA PARA CADA CONDIÇÃO DE %U.R

inclinação do modelo	
0,001	
%U.R	Inclinação da reta
100	0,0955
75	0,0846
60	0,0568
45	0,0408
30	0,0280
12	0,0163
0	0,0130

FONTE: O autor (2022)

GRÁFICO 2: RELAÇÃO MATEMÁTICA DE REGRESSÃO PARA O MODELO MATEMÁTICO (INCLINAÇÃO DA RETA X %U.R)



FONTE: O autor (2022)

5.2 FATOR DE CORREÇÃO

Nos testes realizados em campo, verificou-se que os 3 ambientes avaliados estavam sob diferentes condições de temperatura. O fator de correção permite que o modelo matemático seja corrigido, tenha uma maior precisão e aproximação do valor real de umidade relativa de um determinado ambiente, visto que a umidade é dependente da temperatura do ambiente.

Por isso, para os testes realizados em campo, necessitou-se de três diferentes valores de fator de correção, conforme a Tabela 3, pois esses ambientes estavam sob três diferentes condições de temperatura. Sendo cada fator de correção encontrado o valor a multiplicar cada valor de ΔG já normalizado para o respectivo teste.

TABELA 3: FATORES DE CORREÇÃO PARA OS TESTES EM CAMPO

	Estufa	Ambiente climatizado	Aviário de frangos
e_s ambiente (Pa)	3819,43	3579,62	3502,85
e_s padrão (Pa)	2573,30	2573,30	2573,30
Fator de correção	0,6737	0,7189	0,7346

FONTE: O autor (2022)

5.3 TESTE EM CAMPO DO MODELO MATEMÁTICO

Portanto, para validar o modelo matemático testou-se o mesmo em campo, sendo os testes realizados em três lugares diferentes, com diferentes temperaturas ambientes e umidades relativas.

Para cada um dos testes (Estufa, Ambiente Climatizado e Aviário de frangos) foi feito uma média dos 7200 pontos de umidade relativa do ar enquanto adquiria-se as imagens, obtendo-se:

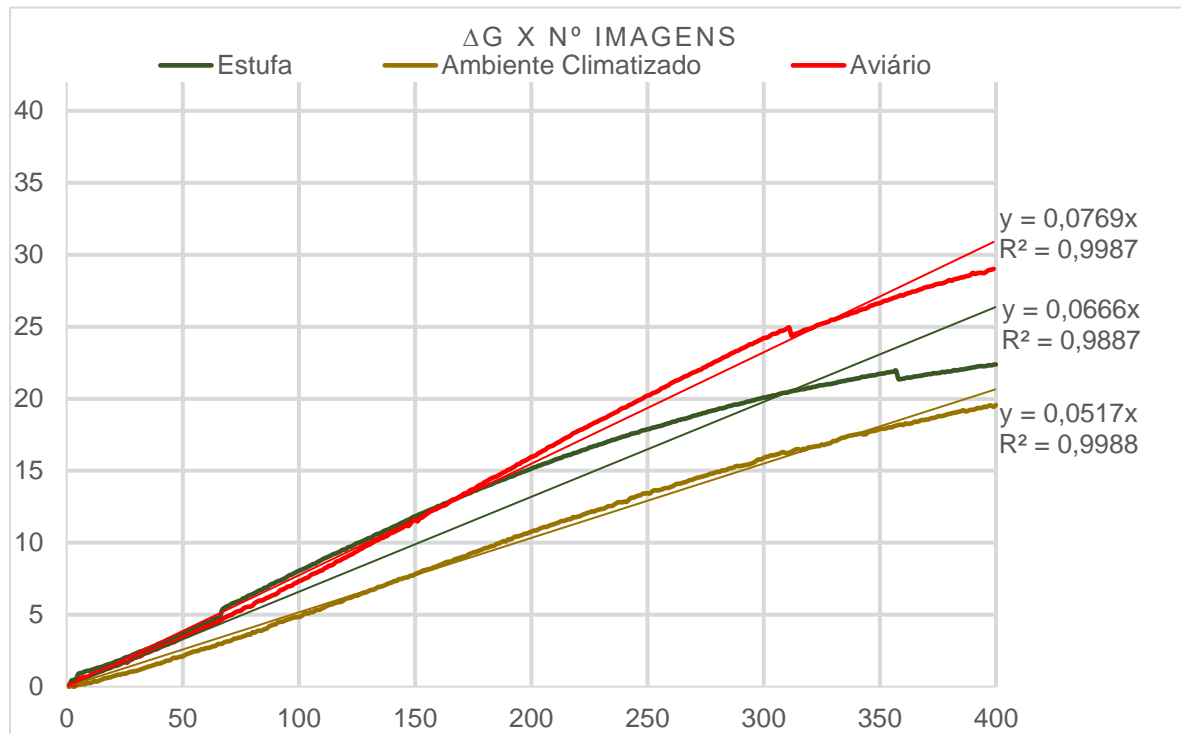
TABELA 4: MÉDIAS DE %U.R DOS TESTES EM CAMPO

	Estufa	Ambiente climatizado	Aviário de frangos
Média de %U.R (4h)	69,13	45,94	82,74

FONTE: O autor (2022)

Em sequência, plotou-se os ΔG (já corrigido) dos três ambientes x nº de imagens, resultando no seguinte gráfico:

GRÁFICO 3: DADOS DOS TESTES PLOTADOS (ΔG x nº DE IMAGENS)



FONTE: O autor (2022)

Observa-se a linearidade dos dados obtidos em campo com seus respectivos R^2 acima de 0,98. Dito isso, sabe-se que a equação que rege o modelo é: $Y = 0,001x$ onde Y é a inclinação da reta e x é a %U.R (Gráfico 2).

Com isso, cada um dos testes realizados em campo nos mostra equações da reta, esses valores obtidos são inseridos na equação da reta do modelo. Sendo:

TABELA 5: PREVISÃO DE %U.R PARA OS TESTES EM CAMPO

	Modelo	Estufa	Ambiente climatizado	Aviário de frangos
Inclinações da reta	0,001	0,0666	0,0517	0,0769
%U.R calculada	-	66,6	51,7	76,9

FONTE: O autor (2022)

Ao comparar as médias de %U.R obtidas pelo sensor elétrico nos três ambientes de teste, pode-se observar uma aproximação das médias de %U.R calculada através do modelo matemático, por meio de imagens digitais de sílica gel adsorvente impregnada com íons tetraclorocobalto (II) (sensor colorimétrico).

Quando compara-se as médias de %U.R obtida pelo sensor elétrico e as médias de %U.R calculada pelo modelo matemático, tem-se que:

TABELA 6: ERRO RELATIVO ENTRE OS SENSORES

	Sensor elétrico (Média de %U.R em 4 horas)	Sensor Colorimétrico (Média de %U.R em 4 horas)	% de Erro relativo
Estufa	69,13	66,6	3,66
Ambiente climatizado	45,94	51,7	12,54
Aviário	82,74	76,9	7,06

FONTE: O autor (2022)

Afirma-se que um erro relativo de 3,66% das medidas na estufa é um erro relativamente baixo frente a um sensor elétrico. Para as medidas no ambiente climatizado obteve-se um erro relativo de 12,54%, o qual também é relativamente baixo. E por fim no aviário de frangos também se obteve um erro relativo baixo do sensor cromático frente ao sensor elétrico, sendo 7,06% de erro relativo.

É importante ressaltar que o modelo contém apenas 7 pontos de calibração, portanto, quanto mais pontos inseridos no modelo o tornaria mais preciso, robusto e próximo da realidade, podendo ser utilizado em qualquer tipo de ambiente independentemente deste ambiente ser hostil ou não (leitura de umidade para gases corrosivos, por exemplo) pois como não atua por meio de campos elétricos não pode ser danificado, e é facilmente substituível/regenerado.

6. CONCLUSÃO

Conclui-se então que, a utilização da sílica gel adsorvente impregnada com íons tetraclorocobalto (II) pode ser utilizada também como sensor colorimétrico para previsão da umidade relativa do ar, ao agregar umidade do ambiente. As imagens digitais e o modelo de cores RGB são promissoras ferramentas que auxiliaram na verificação das nuances e mudanças de cor no sensor colorimétrico. Juntamente com regressões lineares que permitem a automatização do modelo matemático desenvolvido. Dito isso, o modelo matemático desenvolvido neste trabalho apresentou resultados precisos e coerentes com a realidade, podendo ser utilizado para medições de umidade relativa do ar em diferentes ambientes, apresentando baixo erro relativo frente a um sensor elétrico e linearidade nas regressões.

7. REFERÊNCIAS

FERREIRA, J. V. S. **Construção de protótipo para aquisição de imagens digitais visando aplicação em escala de laboratório e possível escala comercial.** 38f. Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2021.

FERST, C. W. **Reutilização da sílica gel como adsorvente para remoção de nitratos de águas.** 41f. Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Campus Cerro Largo, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2018.

GONÇALVES, M. I. S. **Aplicações de imagens digitais e análise multivariada para classificação e determinação de parâmetros de qualidade em plumas de algodão.** 110f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

LAWRENCE, M. G. The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. **Bulletin of the American Meteorological Society.** Mainz, Germany, 17 sep. 2005. Max Planck Institute for Chemistry, Junior Research Group, Department of Atmospheric Chemistry, Postfach 3060, 55020 Mainz, Germany 2005. v. 86, p. 225-234. Disponível em: < <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>>.

LUPETTI, K. O. et al. Análise de imagem em química analítica: empregando metodologias simples e didáticas para entender e prevenir o escurecimento de tecidos vegetais. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 548-554, jun. 2005.

MORAIS, P. A. O. **Previsão e Classificação Textural do Solo Através da Análise Multivariada de Imagens.** 193f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

MORAN, J. M.; MORGANN, M. D. **Meteorology: atmosphere and the science of weather.** 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey: MacMillan, 1989.

PASSARETTI FILHO, J. **Análise de imagens para fins analíticos: aplicações ambientais e tecnológicas.** 161f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Araraquara, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/143007>>.

PONCIANO, P. F. et al. Análise do ambiente para frangos por meio da lógica fuzzy: uma revisão. **Revista Archivos de Zootecnia**, Lavras, Minas Gerais, v. 60, p. 1-13, jan. 2011. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.21071/az.v60i232.4913>>.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia.** Belém do Pará: e-TEC Brasil - Escola Técnica Aberta do Brasil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2011.