



SISTEMA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA QUANTIFICAÇÃO DE IMPUREZAS VEGETAIS NO TRANSPORTE DE CANA

Celso S. Caldas¹; José Robério Cavalcante da Silva²; Johnnatan D. de Freitas³

1 Prof, Dr. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas. celso@centralanalitica.com.br

2 Mestre. Central Analítica. roberio@centralanalitica.com.br

3 Prof, Dr. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas. johnnatan.duarte@ifal.edu.br

Palavras-Chave: Inteligência artificial, impureza vegetal, cana-de-açúcar

Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana do mundo com uma área de plantio estimada para a safra 23/24 de 8.410,3 mil ha, 1,5% maior em relação à safra passada. Nesta área a previsão é que sejam colhidas **637,1 milhões** de toneladas de cana, com crescimento de 4,4% em relação à safra 22/23. Espera-se também um maior rendimento agrícola (+ 2,9%) atingindo 75,75 t cana / ha. Na tabela 01 observa-se essas informações dadas pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (CONAB, 2023), por estado e região do Brasil.

TABELA 01 – Área, produtividade e produção de cana-de-açúcar

Região/UF	ÁREA (Em mil ha)			PRODUTIVIDADE (Em kg/ha)			PRODUÇÃO (Em mil t)		
	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %	Safra 2022/23	Safra 2023/24	VAR. %
NORTE	47,3	48,5	2,6	80.862	83.809	3,6	3.823,0	4.067,0	6,4
AM	3,8	3,9	0,3	56.653	71.484	26,2	218,0	276,0	26,6
PA	15,5	16,4	5,8	79.131	79.949	1,0	1.227,0	1.311,0	6,8
TO	27,9	28,3	1,2	85.160	87.732	3,0	2.378,0	2.480,0	4,3
NORDESTE	871,7	893,4	2,5	64.313	62.342	(3,1)	56.060,7	55.695,7	(0,7)
MA	28,3	29,9	5,8	76.231	76.944	0,9	2.158,1	2.304,3	6,8
PI	21,2	20,5	(3,3)	68.866	69.319	0,7	1.459,0	1.420,0	(2,7)
RN	66,1	66,9	1,1	55.370	54.468	(1,6)	3.662,3	3.643,8	(0,5)
PB	117,6	118,4	0,7	62.080	54.541	(12,1)	7.302,4	6.459,2	(11,5)
PE	237,4	236,7	(0,3)	61.510	58.163	(5,4)	14.605,0	13.764,9	(5,8)
AL	304,3	315,5	3,7	65.197	64.703	(0,8)	19.841,1	20.411,4	2,9
SE	39,6	39,6	-	59.929	56.780	(5,3)	2.375,2	2.250,4	(5,3)
BA	57,0	65,9	15,5	81.695	82.605	1,1	4.657,7	5.441,8	16,8
CENTRO-OESTE	1.767,5	1.785,9	1,0	74.422	78.915	6,0	131.539,2	140.933,3	7,1
MT	174,7	200,6	14,8	90.883	97.231	7,0	15.876,6	19.503,8	22,8
MS	636,0	648,1	1,9	70.174	75.206	7,2	44.627,1	48.744,6	9,2
GO	956,8	937,2	(2,1)	74.241	77.559	4,5	71.035,4	72.684,8	2,3
SUDESTE	5.127,1	5.194,0	1,3	75.629	77.919	3,0	387.755,3	404.710,0	4,4
MG	896,4	955,9	6,6	78.686	81.721	3,9	70.537,9	78.114,9	10,7
ES	47,5	49,6	4,4	58.082	60.521	4,2	2.759,7	3.002,3	8,8
RJ	35,5	35,5	-	44.442	44.272	(0,4)	1.578,2	1.572,2	(0,4)
SP	4.147,6	4.153,0	0,1	75.436	77.539	2,8	312.879,5	322.020,6	2,9
SUL	475,4	488,5	2,8	65.115	64.859	(0,4)	30.953,1	31.686,6	2,4
PR	475,4	488,5	2,8	65.115	64.859	(0,4)	30.953,1	31.686,6	2,4
NORTE/NORDESTE	919,0	941,9	2,5	65.165	63.448	(2,6)	59.883,7	59.762,7	(0,2)
CENTRO-SUL	7.369,9	7.468,4	1,3	74.661	77.303	3,5	550.247,6	577.329,9	4,9
BRASIL	8.288,9	8.410,3	1,5	73.609	75.751	2,9	610.131,4	637.092,6	4,4

Fonte: Conab.

Nota: Estimativa em abril/2023.

Por outro lado, buscando benefícios ambientais e uma melhor conservação do solo, além da integridade da saúde dos trabalhadores rurais e da população circunvizinha às plantações de cana, várias regulamentações são estabelecidas no Brasil proibindo, ou diminuindo gradativamente, a queima da cana como procedimento facilitador do seu corte manual. Exemplo disto é a lei federal do Código Florestal N° 12.651/2012 e o decreto do estado de São Paulo N° 11241/2002 proíbem ou exigem uma diminuição gradativa da prática da queima da cana, quando esta for utilizada para facilitar seu corte. Neste aspecto ressalta-se que, segundo a CONAB (CONAB, 2023), **92,4%** da cana cortada na safra 23/24 será de forma mecanizada, percentual este representando o montante de **588,68 milhões de toneladas de cana**.

As consequências deste percentual de cana colhida crua e de forma mecanizada é um aumento considerável de palhas, bainhas, ponteiros e outras impurezas vegetais na cana processada, modificando totalmente a composição química do caldo de cana, isto porque uma série de compostos orgânicos e inorgânicos solúveis em água se incorporam ao caldo da cana, principalmente ácidos orgânicos e compostos fenólicos.

De uma forma geral, o aumento de impureza vegetal na cana processada impacta negativamente no processamento da cana, principalmente devido: (a) diminuição da densidade da carga de cana; (b) redimensionamento da frota de caminhões transportadores; (c) diminuição da extração do caldo; (d) aumento da acidez do caldo; (e) aumento a concentração de corantes na cana, principalmente os polifenóis, que são precursores de cor no caldo, etc. (CALDAS, 2017; NUNES, 2017; STAB, 2014).

Apesar de tantos impactos negativos e por todas as questões ambientais e socioeconômicas envolvidas, um fato existe: não há como retroceder do corte e colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Ou seja, as indústrias têm que estabelecer ações que visem

minimizar os impactos negativos do aumento da palha na cana, seja na área agrícola, seja na área industrial. Porém, para que tais ações sejam assertivas os resultados de impurezas vegetais existentes na cana devem ser também fidedignos e confiáveis.

O método usual de determinação da quantidade de palha é totalmente subjetivo, provocando assim resultados distorcidos e com baixa confiabilidade, ainda mais porque não existem condições de repetições das análises com a mesma amostra, agravado pela baixa frequência das análises por ser um procedimento bastante trabalhoso e pela impossibilidade de ter uma amostra padrão para validação dos resultados. Esses fatos justificam a utilização de uma nova metodologia baseada na inteligência artificial (rede neural) para quantificação das impurezas vegetais. O surgimento de uma técnica baseada na inteligência artificial (rede neural) onde através da **forma, cor e textura** se identificam as impurezas vegetais em carregamentos de cana é um fato bastante positivo para conhecimento da quantidade de impureza vegetal e para ações de melhorias da qualidade da matéria-prima e processos de produção de açúcar e de etanol.

A técnica avaliada foi um sistema desenvolvido pela empresa CROMAI, onde através de um sensor colocado na sonda amostradora são registradas imagens sequenciadas identificando através de inteligência artificial os materiais como colmo e impurezas vegetais através do seu banco de dados. Todos esses dados são exportados para um aplicativo CROMAI SENTINEL disponível no play store, para na sequência serem liberados para os programas de dados das Unidades Industriais, podendo ainda serem visualizados em tempo real através de dispositivos eletrônicos como celular e tablet. Na figura 01 se observam sensores instalados em sondas oblíquas amostradoras de cana e uma ilustração da captura das imagens.



FIGURA 01 – Sistema de captura das imagens sequenciais na sonda amostradora de cana

O Sensor CROMAI SENTINEL possui mais de 130 mil imagens de amostras em seu banco de dados para o cálculo de impureza vegetal. Porém, cada usina possui suas especificidades como modelo de sonda; visibilidade; posição do sol e variedades de cana, sendo então necessário um período de calibração do sistema, onde são incorporados novos dados de impurezas vegetais determinados pelo método usual ao sistema CROMAI SENTINEL.

O presente estudo foi realizado na safra 2022/2023 em uma usina localizada no estado de Goiás, centro-oeste do Brasil, onde neste período foram processadas **983.399 t de cana**. Inicialmente foi realizada a calibração do sensor com a incorporação de **425** resultados obtidos pelo método manual ao banco de dados do sistema de inteligência CROMAI que já possui mais de **130 mil** dados cadastrados. Na sequência foram realizadas análises comparativas aleatórias em vários horários do dia, isto para que a equação de calibração tivesse uma boa representatividade de acordo com luminosidade da manhã, tarde e noite, já que este fator pode interferir nas leituras do sensor e causar distorções nos resultados. Finalmente, a técnica do sensor CROMAI SENTINEL foi validada pelos métodos estatísticos de Dixon, teste da amplitude interquartilica (IQR), teste de Fischer (teste F), teste T e ainda pelo coeficiente de

determinação (R^2) aplicados aos **216** pares de resultados obtidos pelos métodos usual e pelo sensor CROMAI SENTINEL.

Material e Métodos

O material usado para este estudo foram amostras de cana retiradas dos veículos transportadores de cana através de sonda oblíqua. Os procedimentos de amostragem; preparo e homogeneização das amostras; obtenção do caldo por prensagem e análises químicas se basearam nas Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2014). Foram usadas amostras de cana de 08 (oito) frentes de corte para ampliar cenários como de variedades de cana; idade de maturação; tipos de solos, etc. As análises foram realizadas nos períodos da manhã, tarde e noite para que diferentes luminosidades fossem contempladas nos testes comparativos.

A comparação foi feita com dados obtidos pelo usual para determinação de impureza vegetal que se baseia na identificação e separação de palhas, ponteiros, palmitos e bainhas, além de ervas daninhas, e dados obtidos pelo método de inteligência artificial.

No método por inteligência artificial foi usado um sensor CROMAI SENTINEL acoplado próximo ao final da sonda. Este sensor é composto de uma câmera RGB, microcomputador, relógio, cartão micros, conversor de tensão, refletor e celular.

Os dados foram obtidos de 02/06/22 a 08/08/22 em uma usina localizada no sudeste do Brasil, onde inicialmente foi feita a calibração do sensor com a inclusão de **425** resultados de impurezas vegetais determinadas pelo método usual aos mais de **130 mil** dados já cadastrados no sistema de inteligência CROMAI. A validação desta técnica foi realizada com testes estatísticos aplicados aos **216** resultados comparativos obtidos pelo método usual e pelo sensor CROMAI, sendo usados os métodos estatísticos de Dixon; amplitude interquartílica; Fischer (teste F); teste T e, finalmente, o cálculo do coeficiente de determinação (R^2). Todos os resultados dos testes de validação indicaram a eficiência desta tecnologia para determinação das impurezas vegetais.

Resultados e Discussão

Após o período de inserção de novos dados para aumentar a robustez da curva de calibração do sistema de inteligência CROMAI SENTINEL, a usina passou a realizar suas determinações de impurezas vegetais sem mais ajustes do sensor. Assim, no período (12/07/2022 à 08/08/2022) foram realizadas análises comparativas para validação da nova tecnologia.

Vale destacar que neste período usando o sensor CROMAI foi possível realizar um total de **2.253 amostras**, enquanto que neste mesmo período pelo método convencional foram realizadas apenas **216** determinações, número este baixo, mas compatível com o dimensionamento do quadro técnico do laboratório. Esta capacidade de análises pelo sensor em relação ao método usual representa um aumento de análises equivalente a **1.043%**. No gráfico 02 é possível observar o comportamento das análises comparativas das **216** amostras.

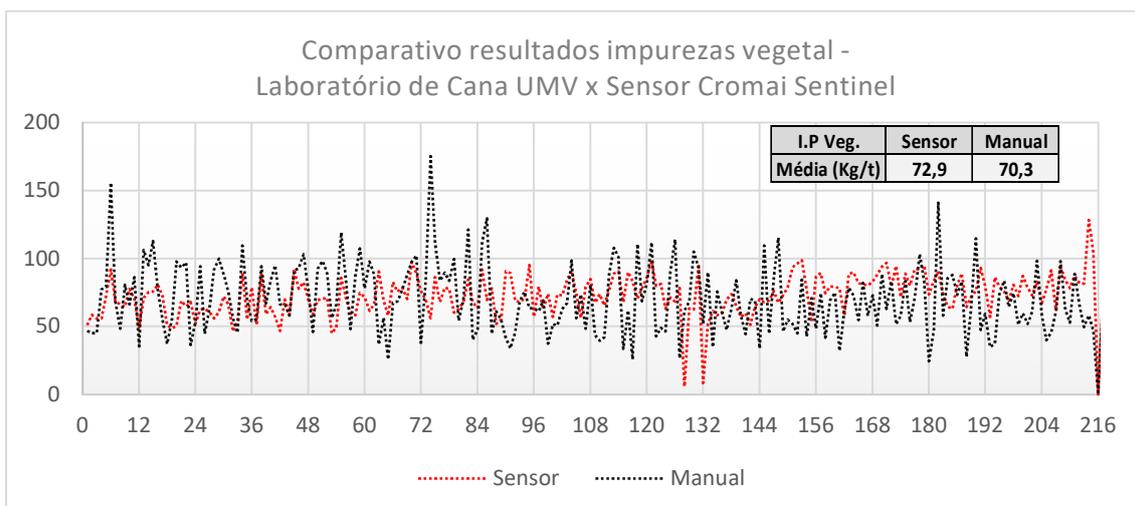


FIGURA 02 – Comportamento das análises comparativas de impurezas vegetais – método manual e por sensor CROMAI

Um fato importante nesta primeira avaliação é que não há uma tendência dos resultados do sensor CROMAI serem maiores ou menores do que os obtidos de forma manual. Isso indica que não há acerto ou erro sistemático nestas medições, que para validação de uma nova tecnologia é bastante importante. As médias aritméticas para ambos métodos foram:

- Método manual – **70,3 Kg/t**
- Método sensor CROMAI - **72,90 Kg/t**.

Uma questão também bastante importante e interessante neste estudo é que o método manual tem, como já mencionado, características negativas que nos levam a considerar que todos os resultados são apenas **indicativos**, tornando as ações tomadas imprecisas, seja nas áreas agrícolas ou nas áreas industriais.

Na figura 03 observam-se as variações dos resultados obtidos pelo método usual, ou manual, com limites inferior e superior respectivamente iguais a: **14,78 Kg/t** e **125,78 Kg/t**, com uma média igual a **70,30 Kg/t**. Nota-se uma ampla faixa entre estes limites evidenciando a subjetividade e incerteza do método.

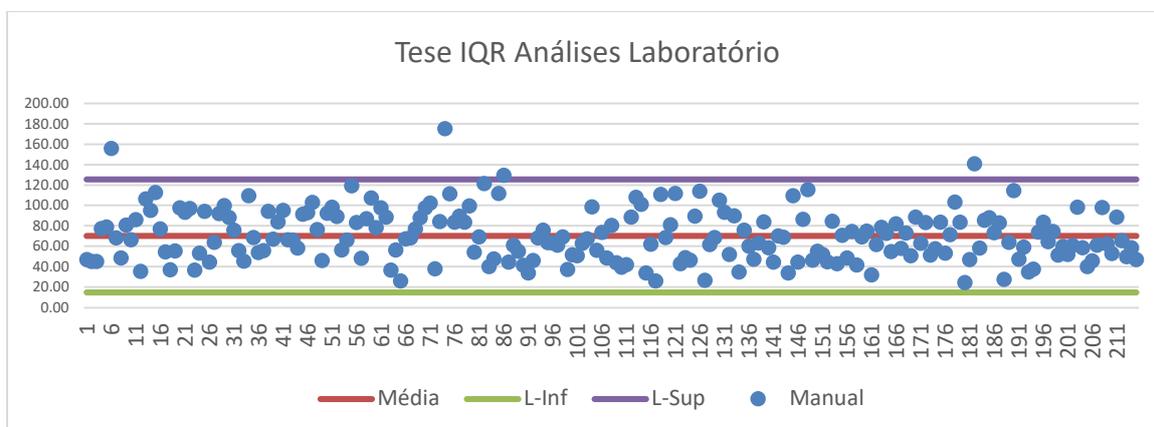


FIGURA 03 – Variação dos resultados de impurezas vegetais determinados pelo método manual

O gráfico de controle com os dados de impurezas vegetais obtidas pelo sensor CROMAI está na figura 04. Neste método os limites inferior e superior, respectivamente, foram **44,25 Kg/t** e **102,75 Kg/t**, com uma média de **72,90 Kg/t**. Este menor range indica uma menor variação dos resultados, justamente porque saímos de um método subjetivo para um método

instrumental que, na maioria das situações, apresentam resultados mais precisos e confiáveis por seguir um fundamento previamente estabelecido, tornando as ações mais assertivas e rápida, uma vez que os resultados obtidos podem ser vistos no momento das medições através de celular ou outros meios eletrônicos.

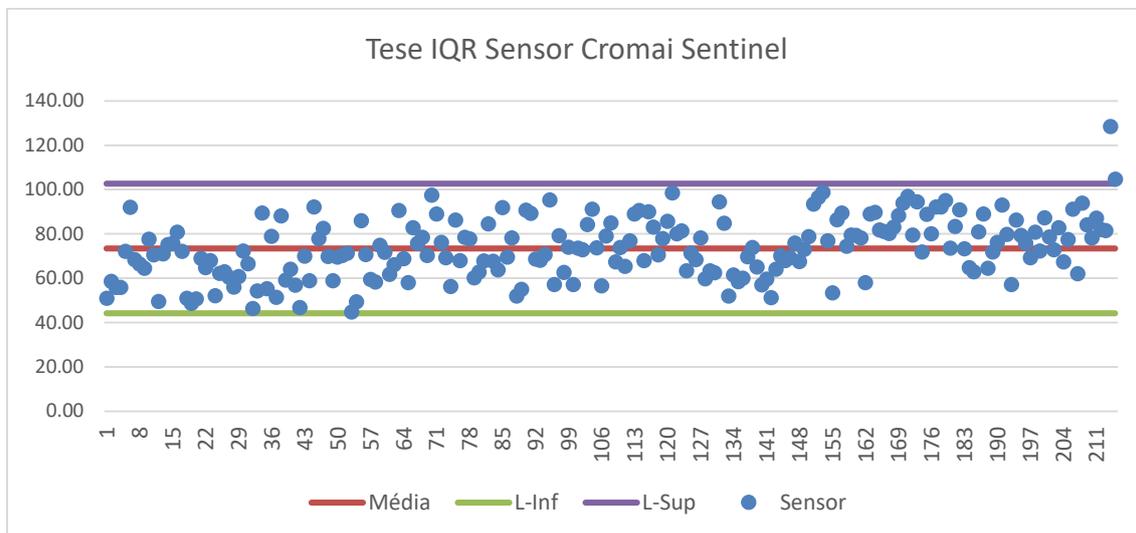


FIGURA 04 – Variação dos resultados de impurezas vegetais determinados pelo método do sensor CROMAI

Neste processo de validação ainda foi elaborado um gráfico de dispersão com cálculo do coeficiente de determinação (R^2). Na figura 05 está o gráfico da dispersão e se observa uma excelente correlação com R^2 igual a **0,8737**.

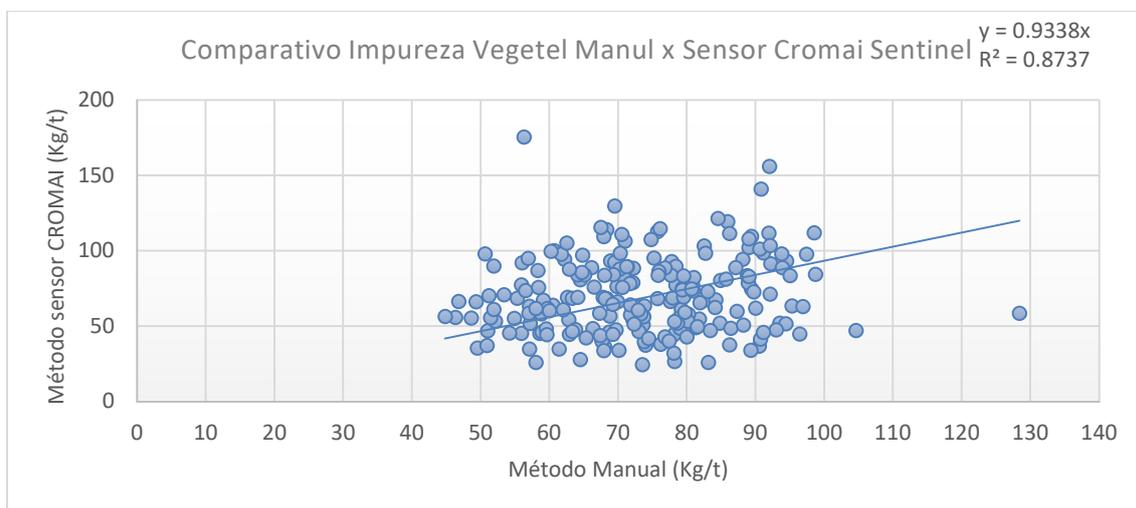


FIGURA 05 – Comportamento entre resultados de impurezas vegetais obtidos pelos métodos manual e pode sensor CROMAI

Finalmente, aos resultados obtidos nas análises comparativas foram aplicados os seguintes métodos estatísticos:

- **Teste de Dixon**

Estes testes serão aplicados para verificar se os resultados extremos (inferior e superior) pertencem à mesma distribuição dos outros resultados. A comparação pode ser realizada ao nível de 5% e 1% de significância. Inicialmente foram calculados os valores calculados de Q para os limites inferior e superior para cada um dos dois métodos. Os dados obtidos estão na tabela 2. Nesta tabela também está o valor de Q tabelado para 90, 95 e 99% de confiança, ou

seja, 10, 5 e 1% de significância. Considerando que os valores calculados de Q são menores do que os valores de Q tabelados para os vários percentuais de confiança, comprova-se que os limites dos dados obtidos pertencem à mesma distribuição e todos podem ser considerados nos cálculos das médias.

TABELA 02 – Resultados da aplicação do teste de Dixon

Teste Dixon- Valores de Q	Método	
	Sensor Cromai Sentinel	Laboratório
Menor valor:	66,73	57,12
Segundo menor valor:	69,56	67,92
Maior valor:	75,84	92,08
Segundo maior valor:	75,79	82,70
Amplitude:	9,11	34,96
Q Calculado- QInferior	0,31	0,31
Q Calculado- QSuperior	0,01	0,27
Q Tabelado (90% de confiança- 10% Sig)	0,468	0,468
Q Tabelado (95% de confiança- 5% Sig)	0,526	0,526
Q Tabelado (99% de confiança- 1% Sig)	0,634	0,634

- **Teste IQR- Intervalo Interquartil**

De maneira semelhante ao Teste de Dixon, este Teste IQR (Interquartile Range) visa a eliminação dos resultados extremos a partir dos quartis 1 e 3, calculando assim os limites inferior e superior. Resultados fora desses limites devem ser descartados. Os resultados dos cálculos deste Teste estão mostrados na tabela 3 a seguir.

TABELA 03 – Resultados da aplicação do teste de IQR

Teste IQR	Método	
	Sensor Cromai Sentinel	Laboratório
Média	72,73	75,48
Quartil1	69,69	68,17
Quartil3	75,76	82,31
IQR	6,07	14,14
L-sup	81,83	96,69
L-inf	63,63	54,26

Os resultados deste teste mostram que todos os dados obtidos por ambos os métodos estão dentro dos limites superior e inferior. Ainda com esses resultados foram elaborados gráficos de controles e com isto visualiza-se que nenhum dado deve ser descartado. Nas figuras 05 encontra-se os gráficos de ambos os métodos com dados das 8 (oito) frente de corte.

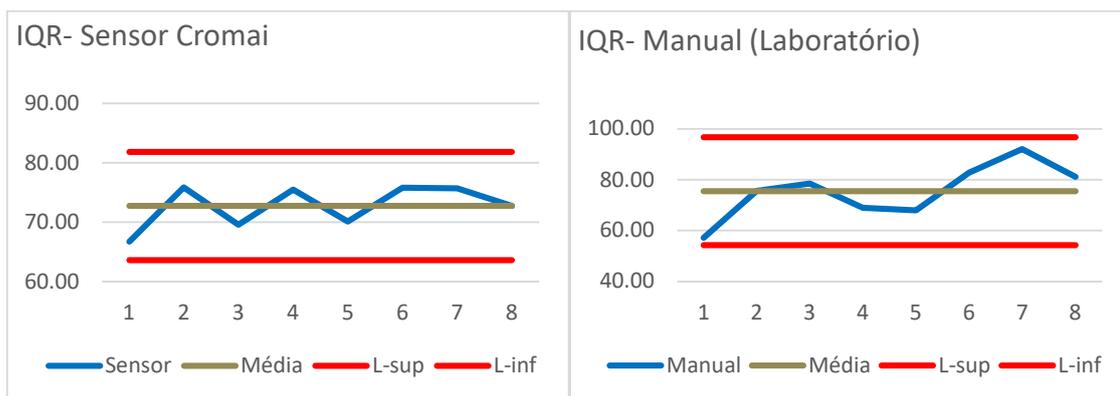


FIGURA 05 – Gráficos do método IQR para ambos os métodos

Este método também permite a elaboração de gráficos chamados “caixa estreita”, sendo usados para comprovação da existência de outliers. Tais gráficos estão apresentados na figura 06 e não indicam existências de outliers, logo sem rejeição de resultados.

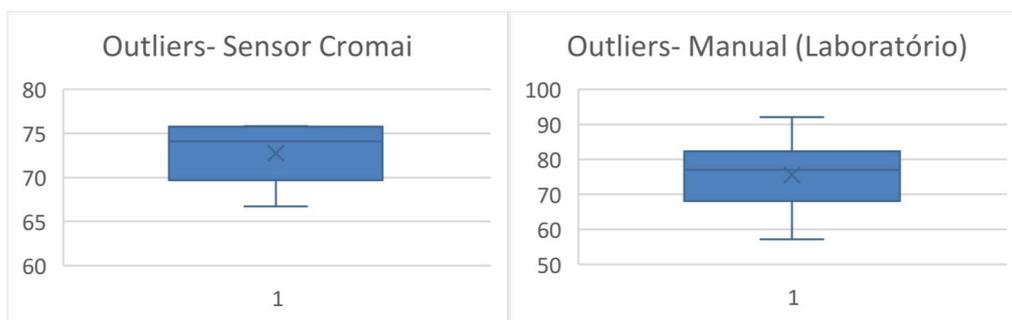


FIGURA 06 – Gráficos do método IQR para ambos os métodos

Pode-se observar, em relação à rejeição de resultados, que pelos testes aplicados (Dixon e IQR) nenhum resultado de ambos os métodos precisa ser eliminado.

- **Teste de Fisher ou Teste F**

O teste F é aplicado para avaliar se a variabilidade dos resultados de um método é maior que a variabilidade do outro método. Se $F_{cal} < F_{tab}$ aceita-se a igualdade das variâncias entre os métodos e esta condição foi a observada nos cálculos como mostrado na tabela 04, ou seja, $0,10930 < 0,26406$.

TABELA 04 – Resultados da aplicação do teste F

	Sensor Cromai Sentinel	Manual (Laboratório)
Média	72,72812858	75,47616739
Variância	12,58023801	115,0973102
Observações	8	8
G1	7	7
F	0,109300886	
P(F<=f) uni-caudal	0,004585084	
F crítico uni-caudal	0,264058226	



Conclusões

Todas as observações e comparações, sejam visuais ou através dos métodos estatísticos, indicam que o sensor CROMAI SENTINEL pode, com segurança, substituir o método usual tornando os resultados de impurezas vegetais em cargas de cana-de-açúcar mais precisos e trazendo vantagens como: (a) resultados mais precisos e imediatos; (b) visualizações em tempo integral por celular e outros meios eletrônicos; (c) análises de todas as amostras de canas retiradas pela sonda; (d) ações imediatas nos ajustes de máquinas colheitadoras; (e) justificativas de qualidade de caldo e consumo de insumos no tratamento do caldo; (f) entendimento de parâmetros de qualidade de açúcar e etanol como, por exemplo, escurecimento rápido do açúcar e acidez do etanol, entre outros.

Assim sendo, não somente validamos a referida técnica CROMAI por inteligência artificial, como a recomendamos para instalações nas 8 (oito) Unidades Industriais do Grupo ATVOS e nas demais indústrias da cana-de-açúcar do Brasil e exterior.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo ATVOS e a empresa CROMAI por possibilitar a participação dos autores na avaliação e validação dos dados deste estudo.

Referências

BRASIL, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Norma N° 16.271 - Qualidade de Cana, 2014.

BRASIL, Código Florestal. Lei N° 12.621, 2021.

BRASIL, Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. Boletim de Safra da Cana-de-açúcar, 26 de abril de 2023, 2023.

CALDAS, C. Interferência de Colheita Mecanizada na Qualidade de Cana Industrial e nos Processos de Fabricação de Açúcar e de Etanol. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB. 24º SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE CANA-DE-AÇÚCAR, Recife, 2023.

DIB, N. Vantagens e Desvantagens da Utilização da PALHA da Cana. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil – STAB, VII Workshop sobre Cana Crua. 2013.

SÃO PAULO (estado). Secretaria do Meio Ambiente. Lei N° 11241, 2002.