

UFRRJ

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

TESE

**Calibração Radiométrica Cruzada de Sensores Orbitais
para Aplicações Ambientais e na Agricultura com
Validação por Espectrorradiometria de Campo**

Ricardo Vilar Neves

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA

CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA CRUZADA DE SENSORES
ORBITAIS PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS E NA AGRICULTURA
COM VALIDAÇÃO POR ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO

RICARDO VILAR NEVES

Sob a orientação do Professor
Mauro Antonio Homem Antunes

Tese submetida como requisito parcial para
obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de
Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e
Inovação em Agropecuária, área de
concentração em Recursos Naturais e
Proteção Ambiental.

Seropédica, RJ
Dezembro de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico
Ficha catalográfica elaborada com os dados fornecidos pelo autor

N511c Neves, Ricardo Vilar, 1977-
CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA CRUZADA DE SENSORES
ORBITAIS PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS E NA AGRICULTURA
COM VALIDAÇÃO POR ESPECTORRADIOMETRIA DE CAMPO /
Ricardo Vilar Neves. - Curitiba, 2024.
95 f.: il.

Orientador: Mauro Antonio Homem Antunes.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciência,
Tecnologia e Inovação em Agropecuária, 2024.

1. Parâmetros de Calibração. 2. Reflectância. 3.
CBERS-4A. 4. Salar de Uyuni. I. Antonio Homem
Antunes, Mauro , 1963-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em
Agropecuária III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 38 / 2024 - PPGCTIA (12.28.01.84)

Nº do Protocolo: 23083.070998/2024-18

Seropédica-RJ, 18 de dezembro de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM
AGROPECUÁRIA

RICARDO VILAR NEVES

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, área de concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

TESE APROVADA EM 16/12/2024

Mauro Antonio Homem Antunes. Ph.D. UFRRJ

(Orientador)

José Marinaldo Gleriani. Dr., UFV

Paula Debiasi. Dra., UFRJ

Júlio Cesar de Oliveira. Dr., UFV

Marcos Adami. Dr., INPE

(Assinado digitalmente em 19/12/2024 10:20)

MAURO ANTONIO HOMEM ANTUNES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matricula: 1315209

(Assinado digitalmente em 19/12/2024 08:14)

MARCOS ADAMI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 899.850.369-72

(Assinado digitalmente em 18/12/2024 12:43)

PAULA DEBIASI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 004.107.580-35

(Assinado digitalmente em 18/12/2024 14:30)

JULIO CESAR DE OLIVEIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 029.587.386-80

(Assinado digitalmente em 18/12/2024 20:45)

JOSE MARINALDO GLERIANI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 065.889.958-90

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **38**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data
de emissão: **18/12/2024** e o código de verificação: **6183c69435**

*“Os grandes feitos são conseguidos não pela
força, mas pela perseverança.”*
Samuel Johnson

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por todas as oportunidades concedidas a mim, pela força e tranquilidade nos momentos de fraqueza e dificuldades.

Ao meu orientador, Mauro Antonio Homem Antunes, expresso minha mais sincera gratidão, admiração e reconhecimento por todo o apoio e dedicação ao longo desta jornada. Sua sabedoria, paciência e vasto conhecimento foram elementos essenciais para o desenvolvimento desta tese. Agradeço por cada correção detalhada, me sinto privilegiado por ter tido a oportunidade de aprender sob sua orientação. Sou e serei eternamente grato por tudo o que fez por mim e por este trabalho. Muito obrigado!

À minha mãe, Paulina Neves, *in memoriam*, minha eterna gratidão por tudo o que fez por mim e por tudo o que me ensinou ao longo da vida. Sua presença em meu coração foi uma fonte constante de força e inspiração durante esta jornada. Embora sua ausência seja sentida todos os dias, seu amor, seus ensinamentos e os valores que me transmitiu continuam guiando meus passos.

Ao meu pai, José Luiz Neves, minha profunda gratidão, seu esforço e sua dedicação para proporcionar o melhor para nossa família foram fundamentais para que eu pudesse alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, que me ensinaram o valor da educação, do trabalho duro e do amor, dedico este trabalho como um reflexo do que sou e do que aprendi com vocês. Este é um pequeno tributo ao legado que construíram e a base sólida que me proporcionaram para sonhar e conquistar.

À minha amada esposa, Alessandra Svonka Palmeiro, meu eterno reconhecimento a você que é minha maior fonte de força, apoio e amor durante toda esta jornada. Desde o início, você esteve ao meu lado, compartilhando cada momento e me incentivando a seguir em frente. Seu carinho e sua paciência infinita foram o alicerce que me manteve firme, mesmo nos momentos mais difíceis. Nos dias de exaustão e incerteza, foi o seu sorriso, suas palavras de encorajamento e seu olhar cheio de confiança que me deram a energia necessária para continuar. Não agradeço apenas pelo amor e apoio emocional, sua parceria e seu coração generoso me demonstraram que este trabalho não é apenas o resultado de um esforço individual, mas a concretização de um sonho que compartilhamos juntos. Anjo, cada página, cada conquista e cada superação carrega um pouco de você, do seu amor e da sua confiança em mim. Sou profundamente grato por ter ao meu lado uma companheira tão extraordinária, que não apenas caminha ao meu lado, mas ilumina o caminho que trilhamos juntos. Te amo hoje e sempre, e dedico esta conquista a nós dois, como símbolo do que podemos alcançar juntos. Obrigado por ser minha esposa, meu amor, minha amiga e minha maior incentivadora. Este é apenas mais um capítulo da nossa história, que ainda tem muito a ser escrito.

Aos professores Dr. José Marinaldo Gleriani, Dra. Paula Debiasi, Dr. Júlio Cesar de Oliveira, Dr. Marcos Adami, membros da banca, pelo tempo dedicado à leitura, às correções e às sugestões e aos colegas professores do Departamento de Engenharia, que permitiram a minha ausência em tempo parcial durante o último ano do doutorado.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelos recursos para aquisição do espectrorradiômetro e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pela infraestrutura do Laboratório de Espectrorradiometria e à CAPES.

À UFRRJ, à coordenação e aos professores do PPGCTIA, à Renata Gomes secretária do programa de pós graduação, sempre atenciosa e prestativa.

RESUMO

NEVES, Ricardo Vilar. **Calibração radiométrica cruzada de sensores orbitais para aplicações ambientais e na agricultura com validação por espectrorradiometria de campo**. 2024. 95f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, UFRRJ, 2024.

Para as aplicações agrícolas e ambientais das imagens de sensoriamento remoto é fundamental a transformação destas em grandezas físicas. Para essa transformação é essencial a calibração dos sensores a bordo dos satélites para garantir a confiabilidade dos resultados. Essa calibração pode ser realizada em laboratório antes do lançamento, ou com o satélite em órbita através da calibração absoluta ou cruzada. A calibração cruzada, que compara a resposta de dois sensores expostos a condições similares de radiação incidente, destaca-se por ser mais econômica e por reduzir as incertezas associadas. Neste estudo, realizou-se a calibração cruzada entre o sensor OLI do satélite Landsat 8 (usado como referência) e o sensor MUX do CBERS-4A (a ser calibrado), utilizando imagens da região de Salar de Uyuni, na Bolívia, o maior deserto de sal do mundo, considerada uma superfície adequada para a calibração de sensores orbitais. Os Números Digitais (NDs) de amostras das mesmas áreas em ambas as imagens foram obtidos para as bandas da faixa espectral do visível e do infravermelho próximo. Os NDs da imagem OLI foram transformados em radiância (L) referenciadas ao topo da atmosfera (nível do satélite) e por meio de uma regressão linear determinou-se os parâmetros de calibração do sensor MUX. Para validar os parâmetros de calibração obtidos, foi utilizada uma área de solo exposto com superfície homogênea, localizada no campus Seropédica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Os dados calibrados do sensor MUX do CBERS-4A foram corrigidos para os efeitos atmosféricos, para obter os valores de reflectância ao nível da superfície. A correção atmosférica foi realizada por meio do modelo físico 6S e adaptado para a correção atmosférica de imagens de satélites. Os dados de reflectância da superfície do sensor MUX foram comparados com os valores de reflectância obtidos em campo com o espectrorradiômetro *FieldSpec 4 Standard Resolution*. Os resultados da calibração comparados com os obtidos na superfície com o espectrorradiômetro, apresentaram uma diferença de reflectância máxima de 0,0297 na banda azul, de 0,0990 para a banda verde, 0,0072 para a banda vermelho e para a banda infravermelho próximo, o valor da diferença máxima obtida foi de -0,0128. A média das diferenças em percentagem entre todas as bandas foram de 1,94%, sendo na faixa espectro do visível (1,26%, 0,76%, 1,75) e na faixa do infravermelho próximo (3,98%). Desta forma, a metodologia proposta da calibração cruzada para o sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A utilizando dados a nível de satélite e realizando a correção atmosférica através do modelo 6S apresentou-se satisfatória, fornecendo a possibilidade de obter a reflectância da superfície de interesse para as aplicações ambientais e na agricultura.

Palavras-chave: Parâmetros de Calibração. Reflectância. CBERS-4A. Salar de Uyuni.

ABSTRACT

NEVES, Ricardo Vilar. **Radiometric cross-calibration of orbital sensors for environmental and agricultural applications with validation by field spectroradiometry**. 2024. 95p. Thesis (Doctor of Science, Technology and Innovation in Agriculture). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024

For agricultural and environmental applications of remote sensing images, it is essential to transform them into physical quantities. For this transformation, it is essential to calibrate the sensors on board the satellites to ensure the reliability of the results. This calibration can be performed in the laboratory before launch, or with the satellite in orbit through absolute or cross calibration. Cross calibration, which compares the response of two sensors exposed to similar incident radiation conditions, stands out for being more economical and for reducing associated uncertainties. In this study, cross calibration was performed between the OLI sensor of the Landsat 8 satellite (used as a reference) and the MUX sensor of CBERS-4A (to be calibrated), using images of the Salar de Uyuni region in Bolivia, the largest salt flat in the world, considered a suitable surface for the calibration of orbital sensors. The Digital Numbers (DNs) of samples from the same areas in both images were obtained for the visible and near-infrared spectral bands. The NDs of the OLI image were transformed into radiance (L) referenced to the top of the atmosphere (satellite level) and the calibration parameters of the MUX sensor were determined through linear regression. To validate the calibration parameters obtained, an exposed soil area with a homogeneous surface, located on the Seropédica campus of the Federal Rural University of Rio de Janeiro (UFRRJ), was used. The calibrated data from the CBERS-4A MUX sensor were corrected for atmospheric effects to obtain the reflectance values at the surface level. The atmospheric correction was performed using the 6S physical model and adapted for the atmospheric correction of satellite images. The surface reflectance data from the MUX sensor were compared with the reflectance values obtained in the field with the FieldSpec 4 Standard Resolution spectroradiometer. The calibration results compared with those obtained on the surface with the spectroradiometer, showed a maximum reflectance difference of 0.0297 in the blue band, 0.0990 for the green band, 0.0072 for the red band and for the near infrared band, the maximum difference value obtained was -0.0128. The average percentage differences between all bands were 1.94%, being in the visible spectrum range (1.26%, 0.76%, 1.75) and in the near infrared range (3.98%). In this way, the proposed cross-calibration methodology for the MUX sensor on board the CBERS-4A satellite using satellite-level data and performing atmospheric correction through the 6S model was satisfactory, providing the possibility of obtaining the reflectance of the surface of interest for environmental and agricultural applications.

Keywords: Calibration Parameters. Reflectance. CBERS-4A. Salar de Uyuni.

RESUMEN EXPANDIDO

NEVES, Ricardo Vilar. **Calibración cruzada radiométrica de sensores orbitales para aplicaciones ambientales y agrícolas con validación mediante espectrorradiometría de campo**. 2024. 95 h. Tesis (Doctorado em Ciencia, Tecnología e Innovación em Agropecuaria). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

1. Introducción

Las imágenes procedentes de sensores ópticos de Teledetección se han aplicado cada vez más al área agrícola y de medio ambiente, así como a estudios relacionados con la información existente sobre la superficie de la Tierra, ya sea por razones de conservación o incluso para predecir eventos futuros. Sin embargo, para que estos estudios sean viables, estos datos deben ser consistentes con la información que se muestra en las imágenes, siendo lo más cercano posible a la realidad.

Para garantizar la detección y cuantificación de información sobre la superficie terrestre mediante sensores orbitales, es necesario realizar una calibración radiométrica de los sensores, con el objetivo de asociar el Número Digital (ND) de las imágenes a valores físicos, como la radiancia o reflectancia (CHANDER; MEYER Y HELDER, 2004).

Cuando los sensores registran las intensidades de la radiación electromagnética (REM), producen una señal proporcional a la variación de la intensidad del flujo radiante incidente en el sistema del sensor, que luego se cuantifica en valores enteros discretos, denominados ND. Cada ND está asociado con un nivel de gris en la imagen, lo que indica un brillo de superficie diferente. En general, la cuantificación de la señal está directamente asociada con la calidad de la información generada por el sensor (PONZONI et al., 2015).

Los ND, sin embargo, no representan unidades físicas, como la radiancia proveniente de objetos en la superficie de la Tierra y, por lo tanto, el ND de un sensor determinado no está relacionado con el ND de otro sensor (CHANDER et al., 2013a). Al utilizar caracterizaciones espectrales, asociación de información de sistemas sensores o incluso comparación de datos de estos, es necesario convertir estos números digitales a valores de cantidades físicas. Para ello se calibra el sensor convirtiendo los ND en cantidades físicas, es decir, consiste en obtener los coeficientes que determinarán la transformación de los ND en radiancia (PONZONI et al., 2015; BARBOSA et al., 2019).

Para calibrar sensores remotos se pueden utilizar los siguientes métodos (DINGUIRARD Y SLATER, 1999; ANTUNES Y TAVARES JÚNIOR, 2005): En la superficie antes del lanzamiento; post-lanzamiento, por instrumento a bordo del satélite; calibración absoluta o indirecta; y calibración cruzada.

La primera calibración de los sensores de imágenes se realiza en el laboratorio antes del lanzamiento. Estos datos se insertan en el sistema de transformación analógico-digital y también son utilizados por los usuarios para transformar imágenes en cantidades físicas (THOME, 2001, HU et al., 2001, TEILLET et al., 2001). Según Chander, Markham y Helder, (2009) la calibración absoluta es costosa e implica incertidumbres en la caracterización de la atmósfera y en la modelización de la transferencia radiactiva.

El método de calibración cruzada consiste en comparar la respuesta entre sensores cuando se exponen a la misma señal de radiación. Este método involucra dos sensores, uno de los cuales se adopta como referencia y, por lo tanto, debe ser calibrado (CHANDER, MARKHAM Y HELDER, 2009).

También cabe señalar que la calibración cruzada minimiza los costos en relación con el método de calibración absoluta, ya que requiere mediciones realizadas en lugares de referencia, como desiertos u otros lugares homogéneos donde se conoce la cantidad de radiación reflejada y emitida (ZANOTTA, FERREIRA Y ZORTEA, 2019).

La calibración radiométrica implica la aplicación de ecuaciones de ajuste, las mismas que utilizan coeficientes proporcionados por el archivo de metadatos que acompaña a la imagen o por la empresa gestora del satélite. El objetivo es de establecer los coeficientes de calibración, o también llamados factores de calibración, que permiten realizar la transformación ND para cada banda de la imagen registrada por el sensor en radiancia (ZANOTTA, FERREIRA Y ZORTEA, 2019).

Los desarrolladores suelen informar los parámetros de calibración de dos maneras diferentes. La primera forma es proporcionando la llamada ganancia y compensación, y como segundo parámetro, la radiancia mínima (L_{\min}) y máxima radiancia (L_{\max}) (ZANOTTA, FERREIRA E ZORTEA, 2019).

La calibración radiométrica, independientemente del método aplicado, consiste en determinar los coeficientes o factores de calibración, que permiten convertir el ND de cada banda de la imagen registrada por el sensor en radiancia (L). Este proceso implica la aplicación de ecuaciones de ajuste, utilizando coeficientes obtenidos de los metadatos de la imagen o proporcionados por la entidad responsable del satélite.

Generalmente, los desarrolladores ponen a disposición los parámetros de calibración de dos maneras principales: la primera a través de valores de ganancia y compensación (intercepción); y la segunda, informando los valores de radiancia mínima (L_{\min}) y máxima (L_{\max}) de la banda espectral. Estos parámetros son fundamentales para la conversión precisa de datos brutos en valores físicos, como lo describen Zanotta, Ferreira y Zortea (2019).

Una vez que tenemos los valores de los parámetros y la calibración del sensor satelital que nos servirá como referencia, los pasos posteriores consisten en transformar estos valores de ND en radiancia (L) y posteriormente en reflectancia (ρ) para tener las características físicas de interés en la superficie. Sin embargo, aunque los datos se convierten en reflectancia, todavía están relacionados con las características a nivel de satélite, lo que requiere una corrección adicional, es decir, la corrección de los efectos atmosféricos.

La corrección atmosférica es un procedimiento necesario en los estudios de teledetección centrados en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los objetivos, ya que permite obtener valores de reflectancia a nivel de superficie. En enfoques multitemporales y/o multisensor, la corrección atmosférica es esencial para obtener mediciones de reflectancia de la superficie representativas de las características espectrales de los objetivos (GAIDA et al., 2020). La corrección atmosférica tiene como objetivo obtener el valor de reflectancia de un píxel a nivel de superficie. En la literatura se encuentran varios métodos para corregir los efectos atmosféricos.

Todo el proceso de calibración, luego de su finalización, debe pasar por una evaluación en relación al resultado obtenido, ya que todo proceso realizado involucra mediciones, las cuales fueron realizadas con la influencia de un observador, capaz de cometer equivocaciones, utilizando equipos, susceptibles de errores, además de que las muestras son recolectadas, en la mayoría de los casos, en diferentes condiciones ambientales y meteorológicas, afectando las mediciones y propagando incertidumbres, las cuales deben ser reveladas a los usuarios, para garantizar la confiabilidad de la información.

Para esta investigación se aplicó una calibración cruzada entre los sensores MUX a bordo del satélite CBERS-4A (a calibrar) y el sensor OLI en Landsat 8 (referencia). Para la corrección atmosférica se aplicó el modelo físico 6S desarrollado por Vermote et al. (1997) y

mejorado por Antunes et al. (2012), y como validación de los datos se realizó un procedimiento de campo, recolectando información con un espectrorradiómetro que sirvió como referencia para validar la imagen calibrada del sensor a bordo del satélite CBERS-4A con los parámetros obtenidos.

Los resultados de la calibración, aunque no son idénticos a los datos del espectrorradiómetro, presentaron valores dentro del rango esperado en función de la resolución de los datos de los sensores, lo que demuestra la eficiencia del enfoque adoptado y resalta la importancia de la calibración cruzada y la corrección atmosférica para garantizar la precisión de los datos de teledetección.

2. Metodología

El área de estudio se definió buscando un área de simulación de una superficie ideal para la calibración de sensores orbitales. Es decir, un área que presentara características espectrales estables en el tiempo con alta reflectancia y mínimo efecto atmosférico. Se trata de la región del Salar de Uyuni, en los Andes - Bolivia, considerado el desierto de sal más grande del mundo.

El área de estudio fue escogida 'llevando en consideración la recomendación de un investigador pionero y especialista en calibración de sensores orbitales, quien señala al Salar de Uyuni como el desierto de sal más grande del mundo, y una zona ideal y de referencia para fines de calibración espectral, para el hemisferio sur (PRICE, 1987).

La región del Salar de Uyuni, por considerarse una superficie homogénea, pseudoinvariante ("sin cambios"), con alta reflectancia, bajo efecto atmosférico, presenta, por lo tanto, varias características necesarias para la calibración de sensores y similares a una superficie lambertiana, donde se refleja toda la energía radiante.

Para realizar la calibración cruzada uno de los requisitos es que los satélites pasen sobre la zona de estudio el mismo día y a la misma hora, ya que el estudio se tiene que realizar con imágenes obtenidas de forma concomitante, es decir, simultánea. Este criterio se justifica por el hecho de que de esta forma las imágenes quedan expuestas a la misma intensidad de energía radiante, además de la cuestión de la geometría aproximada, valores cercanos del sol y ángulos de visión (THOME et al., 2003).

Teillet et al. (2001) señalan en sus investigaciones que en imágenes obtenidas simultáneamente y/o con una diferencia de intervalo de tiempo de hasta 30 minutos, las condiciones atmosféricas tampoco cambian significativamente, siendo un criterio importante para la calibración.

Se fijó la fecha del 05/01/2024 para la adquisición de imágenes de los sensores Landsat 8 y CBERS-4A (paso simultáneo). Posteriormente se definieron los criterios a seguir, así como el número de muestras a recolectar de los mismos. Se definieron un total de 24 muestras, obtenidas simultáneamente (en ambas imágenes), en las que cada muestra cubrió un área de 60m x 60m. Sin embargo, debido a las diferentes resoluciones espaciales de los satélites, las muestras obtenidas en la imagen Landsat 8 fueron relativas a 4 píxeles, mientras que en CBERS-4A, para la misma muestra, fueron aproximadamente 16 píxeles.

Los criterios definidos para la recolección de muestras, en cuanto a la elección del número y el cálculo del promedio de los ND de píxeles adyacentes a través del promedio simple, apuntaron a minimizar posibles inconsistencias relacionadas con la variabilidad espacial, es decir, se distribuyen también las pequeñas variaciones en la respuesta radiométrica entre píxeles adyacentes.

El siguiente paso consistió en transformar los ND en radiancia (L) para cada una de las bandas de la imagen dada (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano), al invertir la ecuación de la línea de calibración de las imágenes del satélite Landsat 8. La transformación realizada solo fue posible debido a que el sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8 está calibrado, y el archivo de metadatos contiene información sobre las radiancias máximas y mínimas.

Una vez convertidos los valores de ND en radiancia (L) para el satélite Landsat 8, el paso posterior consistió en generar diagramas de dispersión y obtener la ecuación de la recta ajustada y sus coeficientes angular (a) y lineal (b), también llamados de coeficientes de regresión. Estos coeficientes son la base para calcular los coeficientes de calibración (L_{\max} y L_{\min}) del sensor a calibrar, es decir, el sensor satelital CBERS-4A,

Con el resultado de la correlación se obtuvieron 8 parámetros de calibración (L_{\max} y L_{\min}), ya que se obtienen 2 parámetros para cada banda (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano), lo que permitió transformar los NDs de la imagen CBERS-4A en radiancia (L). En esta etapa, todos los valores de ND de la imagen CBERS-4A que fueron convertidos a radiancia, ahora tienen las características físicas de interés, sin embargo, aún no están relacionados con el nivel de la superficie terrestre sino con el nivel del satélite, es decir, en la cima de la atmósfera.

De esta correlación se obtienen los valores de los coeficientes de regresión de la recta ajustada, los valores máximo y mínimo de ND son relativos a la resolución radiométrica del sensor, en este caso CBERS-4A. Es decir, los valores máximo y mínimo de radiancia (L_{\max} y L_{\min}) para cada banda del sensor CBERS-4A MUX, mediante el método de calibración cruzada, con los valores provenientes del sensor Landsat 8. Con estos valores es posible obtener el valor de radiancia (L) para cada banda de la imagen.

Se realizaron análisis de los supuestos estadísticos de una regresión lineal, los cuales sirvieron como bases fundamentales para garantizar la validez, confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos por el modelo. Estos supuestos determinan si las estimaciones los parámetros de calibración por la regresión pueden interpretarse correctamente.

Una vez determinados los parámetros de calibración cruzada entre los sensores a bordo de los satélites Landsat 8 y CBERS-4A, el paso siguiente consistió en validar los datos. Para ello, se determinó una segunda área de estudio, que se definió por presentar cierta homogeneidad, invariancia, con alta reflectancia por ser un área de suelo expuesto, y ubicada en el campus Seropédica de la UFRJ, en los alrededores del Instituto de Geociencias.

Una vez determinada el área, los pasos de validación consistieron en obtener una nueva imagen del sensor MUX a bordo del satélite CBERS-4A, aplicar los parámetros de calibración determinados en el paso anterior y comparar con datos de un levantamiento de campo realizado con un espectrorradiómetro. Para ello, fue necesario un estudio para que el paso del satélite por la UFRJ fuera concomitante con la fecha del reconocimiento de campo, y esta fecha ocurrió el 12/05/2024.

Con los datos en la mano, el siguiente paso consistió en aplicar el modelo físico 6S a los datos de imagen calibrados del CBERS-4A ya que toda la información aún estaba a nivel de satélite, siendo necesario aplicar esta corrección atmosférica para que se pudieran analizar las reflectancias de interés, reducido al nivel de la superficie y comparado con los datos del espectrorradiómetro, validando la metodología propuesta en la investigación.

3. Resultado y Discusión

Como resultado de los diagramas de dispersión se obtuvieron los valores de los coeficientes angulares y lineales de la recta, los cuales fueron utilizados para calcular los parámetros de calibración del sensor MUX a bordo del satélite CBERS-4A, con base en valores

de radiancia máxima (L_{\max}) y mínima (L_{\min}), además de los supuestos estadísticos de linealidad de la relación entre variables, la prueba de normalidad, homocedasticidad (varianza constante de los residuos) e independencia de los errores para cada una de las bandas de los sensores de los satélites Landsat y CBERS-4A, cuyas pruebas fueron realizadas en el software R.

Estos valores fueron necesarios para transformar los valores ND en radiancia, los cuales no eran conocidos, ya que los sensores del satélite CBERS-4A no están calibrados, a diferencia de lo que ocurre con Landsat 8, que proporciona esta información a través de un archivo de metadatos. Por lo tanto, estos parámetros se utilizaron para obtener información con características físicas de interés, sin embargo, apenas en la región de la parte superior de la atmósfera (*Top of Atmosphere - TOA*) y no en la superficie física.

Los parámetros de calibración resultantes de la correlación para cada banda fueron: banda azul (B5) con $L_{\min} = 12,8647$ y $L_{\max} = 300,5186$; banda verde (B6) con $L_{\min} = 15,8042$ y $L_{\max} = 318,75361$; banda roja (B7) con $L_{\min} = 15,1825$ y $L_{\max} = 304,7271$; e banda infrarroja cercana (B8) con $L_{\min} = 13,5465$ y $L_{\max} = 223,8836$.

El análisis de regresión es una técnica estadística ampliamente utilizada para analizar la relación entre variables y hacer predicciones. Y el coeficiente de determinación (R^2) indica qué tan bien se ajusta el modelo de regresión a los datos. En otras palabras, R^2 es una medida estadística importante para determinar que tan bien se ajusta el modelo a los datos. Con un rango de 0 a 1, R^2 indica el ajuste de la línea de regresión a los datos, es decir, cuanto más cerca esté el resultado de 1, mejor será el ajuste de la regresión lineal a los datos. A partir de esta definición y analizando los gráficos, así como los resultados transcritos de los parámetros de calibración obtenidos de la correlación de números digitales y radiancias para cada banda del CBERS-4A y Landsat 8, su calidad se puede ver en función del ajuste de los modelos de regresión y en base al resultado del coeficiente R^2 , todos ellos cercanos a 1.

Las pruebas estadísticas aplicadas (Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan y Durbin-Watson) confirmaron la validez de la regresión, a pesar de la presencia de heterocedasticidad en las bandas visibles, explicada por la variabilidad de las superficies. Sin embargo, se consideró que la heterocedasticidad es inherente a la naturaleza de los datos, ya que presentan residuos que aumentan a medida que aumentan los valores de radiancia y ND.

Una vez determinados los parámetros de calibración, el paso posterior consistió en aplicar el modelo físico de corrección atmosférica 6S, (Vermote et al., 1997, Antunes et al., 2012), obteniendo como resultado la imagen calibrada en reflectancia a nivel de superficie, con las características físicas de interés y también fue necesario realizar la validación de la metodología propuesta de calibración cruzada utilizando la información recolectada en campo con el espectrorradiómetro.

Las lecturas radiométricas destinadas al cálculo de los valores de reflectancia se llevaron a cabo entre las 9:30 y las 10:30 horas el día 13/05/2024, en dieciséis puntos diferentes (muestras) sobre el terreno, uniformemente espaciados entre sí y ubicados en el campo con un receptor GNSS RTK utilizando el método de localización. Los datos del estudio GNSS RTK se utilizaron para identificar las coordenadas de los puntos sobre el terreno, que luego se superpusieron a la imagen calibrada del sensor CBERS 4A MUX.

Para cada uno de los dieciséis (16) puntos en el terreno, se tomaron lecturas del objetivo (suelo) y de la placa *Spectralon*, utilizando el espectrorradiómetro, y estos datos se procesaron utilizando el *software View Spec*.

Los valores de reflectancia del CBERS-4A, corregidos por el modelo 6S, son muy próximos a los datos de reflectancia recogidos en campo mediante el espectrorradiómetro en los dieciséis puntos analizados, con énfasis en las bandas B5 (azul) y B6 (verde). La consistencia relativa observada entre los dos conjuntos de datos confirma la eficacia del modelo de calibración aplicado a CBERS-4A, garantizando una representación precisa de las

condiciones de la superficie a partir de los datos orbitales. Los análisis estadísticos descriptivos (máximos; mínimos; media; desviación estándar) para cada banda fueron: (0,1117; 0,0819; 0,0946; 0,0079) para B5; (0,1490; 0,1139; 0,1325; 0,0105) para B6; (0,1952; 0,1392; 0,1662; 0,0145) para B7 y (0,2612; 0,1853; 0,2191; 0,0200) para B8, respectivamente.

Las diferencias porcentuales promedio entre todas las bandas fueron del 1,94%, estando en el rango del espectro visible (1,26%, 0,76%, 1,75) y en el rango del infrarrojo cercano (3,98%).

4. Consideraciones Finales

La teledetección se ha convertido en una herramienta imprescindible para obtener información sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo, siendo ampliamente utilizada en diversos campos, como aplicaciones en agricultura y monitorización medioambiental. Sin embargo, la eficacia de estas aplicaciones depende en gran medida de la calibración precisa de los sensores orbitales y de la corrección atmosférica de los datos obtenidos.

En este contexto, la metodología propuesta en la tesis consistió en la calibración cruzada del sensor MUX a bordo del satélite CBERS-4A en relación al sensor OLI del Landsat 8, este último a su vez utilizado como referencia, ya que sus metadatos son puestos a disposición por la agencia, con toda la información sobre su calibración necesaria para la mencionada investigación. Una vez calibrada, la imagen CBERS-4A fue corregida por efectos atmosféricos utilizando el modelo de corrección atmosférica física 6S, para validar la precisión con mediciones de campo, obtenidas con el espectrorradiómetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution*.

Por lo tanto, se concluye que la calibración cruzada más la corrección atmosférica utilizando el modelo 6S fue validada, asegurando que los datos del sensor MUX CBERS-4A representan con precisión las condiciones de la superficie. Los análisis estadísticos y la comparación con datos de campo refuerzan la confiabilidad de los resultados, especialmente para aplicaciones que requieren alta precisión en teledetección. El estudio destaca la importancia de realizar correcciones atmosféricas robustas y validaciones con datos de campo para garantizar la precisión de los sensores orbitales.

De esta manera, la metodología de calibración cruzada propuesta para el sensor MUX a bordo del satélite CBERS-4A utilizando datos a nivel de satélite y realizando corrección atmosférica a través del modelo 6S resultó satisfactoria, brindando la posibilidad de obtener la reflectancia de la superficie de interés para aplicaciones ambientales y agrícolas.

Como consideraciones finales, cabe destacar que las dificultades encontradas durante la ejecución de la investigación se debieron principalmente a las condiciones atmosféricas adversas hasta encontrar la situación ideal, con cielos despejados y con el paso del CBERS-4A por el área de estudio concomitantemente con el trabajo de campo con el espectrorradiómetro, para validar la calibración cruzada de los resultados.

Palabras clave: Parámetros de calibración. Reflectancia. CBERS-4A. Salar de Uyuni.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Grandezas radiométricas.....	13
Tabela 2:	Parâmetros dos satélites CBERS.....	20
Tabela 3:	Resoluções da câmera PAN.....	21
Tabela 4:	Resoluções da câmera MUX.....	21
Tabela 5:	Resoluções da câmera IRS.....	22
Tabela 6:	Resoluções da câmera WFI.....	22
Tabela 7:	Resoluções da câmera WPM.....	23
Tabela 8:	Resoluções da câmera CCD.....	23
Tabela 9:	Resoluções da câmera IRMSS.....	24
Tabela 10:	Resoluções da câmera HRC.....	24
Tabela 11:	Parâmetros do CBERS-4A.....	24
Tabela 12:	Informações técnicas do Landsat 8.....	27
Tabela 13:	Resoluções do sensor OLI e TIRS embarcado no satélite Landsat 8.....	27
Tabela 14:	Informações técnicas dos satélites da missão Sentinel.....	29
Tabela 15:	Resoluções do sensor MSI embarcado nos satélites Sentinel 2.....	30
Tabela 16:	Data e hora de passagem dos satélites concomitantes no Salar do Uyuni.....	37
Tabela 17:	Valor médio dos NDs e análise estatística descritiva obtidos para cada amostra sobre as bandas do azul (OLI - B2 e MUX - B5), verde (OLI - B3 e MUX - B6), vermelho (OLI - B4 e MUX - B7) e infravermelho (OLI - B5 e MUX - B8).....	52
Tabela 18:	Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda azul (B2).....	54
Tabela 19:	Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda verde (B3).....	55
Tabela 20:	Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda vermelho (B4).....	56
Tabela 21:	Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda infravermelho próximo (B5).....	57
Tabela 22:	Pressupostos estatísticos para a banda azul (B5).....	61
Tabela 23:	Pressupostos estatísticos para a banda verde (B6).....	63
Tabela 24:	Pressupostos estatísticos para a banda vermelho (B7).....	65
Tabela 25:	Pressupostos estatísticos para a banda infravermelho-próximo (B8).....	67
Tabela 26:	Parâmetros de calibração do sensor MUX do satélite CBERS-4A.....	68
Tabela 27:	Reflectância das amostras de cada banda do CBERS-4A calibrado e suas respectivas análises estatísticas descritivas.....	68
Tabela 28:	Exemplo de resultados das amostras coletadas em campo para o ponto 2 com o espectrorradiômetro do solo e placa de <i>Spectralon</i>	70
Tabela 29:	Resultados dos valores da FRN do sensor MUX do CBERS-4A no ponto 2.....	71

Tabela 30:	Exemplo do resultado dos valores da radiância nos alvos em função das FRN para cada banda do sensor MUX CBERS-4A no ponto 2.....	72
Tabela 31:	Valores da radiância da placa em função das FRN para cada banda do sensor MUX do CBERS-4A no ponto 2.....	73
Tabela 32:	Resultados dos valores da reflectância normalizada dos alvos para cada banda do sensor MUX do CBERS-4A e suas respectivas análises estatísticas descritivas.....	74
Tabela 33:	Diferenças dos valores de reflectância entre o espectrorradiômetro e a imagem do sensor MUX do CBERS-4A calibrada e suas respectivas análises estatísticas descritivas.....	75
Tabela 34:	Reflectância a nível de superfície do satélite Landsat 8 e Sentinel 2A para as bandas do visível e do infravermelho próximo (IVP).....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Campo de luz formado por fótons de distintos comprimentos de onda (λ_i)	8
Figura 2:	Geometria associada a definição de ângulo sólido Ω	9
Figura 3:	Ilustração da intensidade radiante (I) no ângulo sólido (Ω) na direção do ângulo zenital (θ) e azimutal (ϕ). (A) radiação emergindo de uma fonte pontual; (B) radiação em um ponto do espaço ou incidindo num ponto de um alvo.....	10
Figura 4:	Hierarquia dos conceitos radiométricos.....	11
Figura 5:	Componentes radiométricos. (1) Energia Radiante; (2) o Fluxo Radiante; (3) Irradiância; e (4) Radiância.....	11
Figura 6:	Método de calibração cruzada.....	15
Figura 7:	Série Histórica do Landsat.....	25
Figura 8:	Configuração orbital do Sentinel 2.....	28
Figura 9:	Sensor MSI dos satélites Sentinel 2.....	29
Figura 10:	Espectrorradiômetro.....	30
Figura 11:	Relações angulares do fator de reflectância.....	31
Figura 12:	Mapa de localização da primeira área de estudo (Salar de Uyuni).....	33
Figura 13:	Mapa de localização da segunda área de estudo (área de validação UFRRJ).....	34
Figura 14:	Fluxograma da metodologia proposta para a determinação dos parâmetros de calibração.....	35
Figura 15:	Página do site N2yo.com.....	36
Figura 16:	Catálogo de imagens do INPE.....	37
Figura 17:	Explorador de imagens do USGS.....	38
Figura 18:	Automatização de coleta de amostras de ND no QGIS.....	39
Figura 19:	Gráfico da correlação entre os dados dos sensores de referência e o a ser calibrado.....	41
Figura 20:	Fluxograma da metodologia proposta para validar os parâmetros de calibração.....	42
Figura 21:	Distribuição das amostras para validação dos parâmetros de calibração....	43
Figura 22:	Coleta de dados das amostras de solo com o espectrorradiômetro.....	44
Figura 23:	Área de solo exposto e de coleta das amostras de validação com o espectrorradiômetro.....	45
Figura 24:	Planilha e gráfico dinâmico para detecção de outliers.....	46
Figura 25:	Distribuição das amostras filtradas para validação dos parâmetros de calibração.....	47
Figura 26:	Correção do efeito atmosférico para validação a nível de superfície.....	49
Figura 27:	Imagens obtidas do sensor OLI do Landsat 8 e do sensor MUX do CBERS-4A, do Salar de Uyuni, Bolívia.....	50
Figura 28:	Amostras na área de sobreposição das imagens obtidas do sensor OLI do Landsat 8 e do sensor MUX do CBERS-4A, do Salar de Uyuni, Bolívia...	51

Figura 29:	Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A para a banda azul (B2/B5).....	58
Figura 30:	Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A para a banda verde (B3/B6).....	58
Figura 31:	Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A, para a banda vermelho (B4/B7).....	59
Figura 32:	Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A, para a banda infravermelho próximo (B5/B8)....	59
Figura 33:	Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda azul.....	60
Figura 34:	Gráfico Q-Q dos Resíduos (normalidade) para a banda azul.....	61
Figura 35:	Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda verde.....	62
Figura 36:	Gráfico Q-Q dos Resíduos (Normalidade) para a banda verde.....	62
Figura 37:	Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda vermelho.....	64
Figura 38:	Gráfico Q-Q dos Resíduos (Normalidade) para a banda vermelho.....	64
Figura 39:	Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda infravermelho.....	66
Figura 40:	Gráfico Q-Q dos Resíduos (Normalidade) para a banda infravermelho....	66
Figura 41:	Gráfico da radiância do solo para o ponto 2.....	69
Figura 42:	Gráfico da radiância da placa para o ponto 2.....	69
Figura 43:	Gráfico de resposta normalizada para o CBERS-4A – MUX.....	70
Figura 44:	Comparação da diferença média por banda entre os pontos de validação na imagem calibrada do sensor MUX do CBERS-4A e o espectrorradiômetro.....	76
Figura 45:	Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda azul).....	78
Figura 46:	Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda verde).....	78
Figura 47:	Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda vermelho).....	79
Figura 48:	Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda infravermelho).....	79

LISTAS DE ABREVIACÕES E SIGLAS

5S	<i>Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum</i>
6S	<i>Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum</i>
ACORN	<i>Atmospheric CORrection Now</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
ATCOR	<i>Atmospheric/ Topographic CORrection</i>
CAST	<i>China Academy of Space Technology</i>
CBERS	<i>China Brazil Earth Resources Satellite</i>
CCD	<i>High Resolution CCD Camera</i>
DOS	<i>Dark Object Subtraction</i>
EPF	<i>Extended Payload Fairing</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
FR	Fator de Reflectância
FRB	Fator de Reflectância Bidirecional
HRC	<i>High Resolution Camera</i>
iCOR	<i>Image CORrection for atmospheric effects</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field Of View</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRMSS	<i>Infrared Multispectral Scanner</i>
IRS	<i>Infrared Resolution Scanner</i>
MODTRAN	<i>MODerate resolution atmospheric TRANsmission</i>
MUX	<i>Multispectral Camera</i>
ND	Número Digital
NDs	Números Digitais
NIR	<i>Near Infrared</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PAN	<i>Panchromatic and Multispectral Camera</i>
REM	Radiação Eletromagnética
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SR	Sensoriamento Remoto
SWIR	<i>Short-Wave Infrared</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TOA	<i>Top of the Atmosphere</i>
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
WFI	<i>Wide Field Imager</i>
WPM	<i>Wide Scan Panchromatic and Multispectral Camera</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 Princípios da Radiometria.....	6
2.2 Grandezas Radiométricas.....	7
2.3 Relação entre Grandezas Radiométricas.....	11
2.3.1 Interação entre a radiação e o objeto.....	11
2.4 Calibração de Sensores Orbitais.....	14
2.5 Correção Atmosférica.....	17
2.6 Programa CBERS.....	19
2.7 Série Landsat.....	24
2.8 Missão Sentinel 2	27
2.9 Espectrorradiômetro.....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Delimitação da Área de Estudo.....	33
3.2 Material.....	34
3.3 Métodos.....	35
3.3.1 Aquisição dos dados e procedimentos para a realização da calibração cruzada.....	35
3.3.2 Primeira etapa – determinação dos parâmetros de calibração.....	35
3.3.3 Segunda etapa – validação dos parâmetros de calibração.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1 Áreas de Estudo – Salar de Uyuni e UFRRJ.....	50
4.2 Amostras das Imagens dos Sensores dos Satélites Landsat 8 e CBERS-4A.....	51
4.3 Conversão dos NDs em Radiância (L) para cada Banda do Landsat 8.....	52
4.4 Correção Atmosférica aplicando o Modelo 6S.....	68
4.5 Dados do Espectrorradiômetro.....	69
4.6 Análise da Significância Estatística das Diferenças entre a Imagem CBERS-4A e os Dados do Espectrorradiômetro.....	75
4.7 Análise Comparativa dos Valores de Reflectância entre o Espectrorradiômetro, CBERS-4A Calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A.....	76
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
7 ANEXO A - METADADOS LANDSAT 8.....	90

1 INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto (SR) é a técnica de obtenção de informações sobre a superfície da Terra ou de outros corpos celestes a partir de sensores em diversos níveis, terrestres aéreos e orbital, por meio da detecção e medição da radiação eletromagnética refletida ou emitida, com o objetivo de monitorar, mapear e modelar os processos e características do ambiente (SCHOWENGERDT, 2012).

As informações provenientes das imagens de satélites, têm sido cada vez mais incorporadas para estudos e monitoramento, não somente do ponto de vista de mapeamento, mas principalmente, para a tomada de decisões de problemas relacionados com o controle e a preservação de recursos naturais e de sustentabilidade.

Segundo Formaggio e Sanches (2017) a agricultura desempenha papel insubstituível em todos os países, em razão de ser a principal provedora de alimentos, fibras e matérias-primas para energia (biocombustíveis), além de propiciar muitos outros tipos de benefícios diretos e indiretos para a sociedade. Recentes estudos internacionais desenhando cenários para décadas futuras mostram que, até o ano de 2050, para atender as demandas de segurança alimentar, de governança e de sustentabilidade, será necessário praticamente duplicar os atuais níveis de produção agrícola do planeta, ao mesmo tempo que a chamada pegada ambiental da agricultura precisará ser encolhida drasticamente (Foley et al., 2011; The Royal Society, 2016).

A agricultura apresenta benefícios, mas também impactos, como a perda de biodiversidade e a fragmentação de *habitats* devido à expansão agrícola (Dirzo & Raven, 2003), o aumento das emissões de gases do efeito estufa relacionadas ao desmatamento, produção agrícola e fertilização (Burney, Davis & Lobell, 2010) e a degradação dos solos e ambientes agrícolas (Trabaquini, Formaggio & Galvão, 2015). Diante disso, é essencial monitorar a atividade agrícola de forma eficiente para equilibrar produção e sustentabilidade. Atzberger et al. (2013; 2015) destacam que o sensoriamento remoto é uma ferramenta eficaz e de ótimo custo-benefício para fornecer dados detalhados e frequentes sobre grandes áreas agrícolas.

Dentre as aplicações do SR na agricultura fazendo uso de sensores orbitais calibrados, destaca-se, por exemplo: estimativas de biomassa e de produtividade; informações de áreas plantadas com culturas agrícolas; mapeamentos de distúrbios e de estresses; avaliações de eventos climáticos desastrosos sobre produções agrícolas; identificação de padrões de plantio e de sistemas de produção agrícola; provisão de informações tipo linhas de base para seguros agrícolas; informações para auxiliar o entendimento de possíveis efeitos de mudanças climáticas; identificação de áreas com *gaps* de produtividade; mapeamento do desenvolvimento fenológico das culturas e necessidades de documentação (FORMAGGIO E SANCHES, 2017).

As aplicações do SR, em muitos casos, necessitam da caracterização espectral dos alvos e o estabelecimento de correlações entre dados radiométricos e dados biofísicos ou geofísicos, os quais são baseados em grandezas radiométricas e cujos cálculos incluem correções atmosféricas (OLIVEIRA, PONZONI E MORAES, 2009). Desta forma, para que uma análise espectral a partir de sensores remotos seja realizada de forma consistente, é de fundamental importância ter a calibração do sensor de modo a permitir a transformação das imagens em dados físicos, bem como determinar qual o método de correção atmosférica será o mais adequado a ser adotado para cada situação e/ou aplicação.

Atualmente, encontra-se na literatura, diversos métodos para correção atmosférica aplicáveis a dados multiespectrais e hiperespectrais, sendo classificados em sua maioria como: métodos físicos, métodos empíricos e métodos híbridos. Contudo, a aplicação mais comumente utilizada por diversos pesquisadores são dos métodos físicos, os quais consideram as características atmosféricas no momento de obtenção da imagem (LATORRE et al., 2002; SOARES, 2017; GAIDA et al., 2020).

Para garantir a confiabilidade na coleta de dados provenientes de sensores orbitais e a exatidão das informações geradas, é essencial realizar etapas preliminares cruciais, como a correção atmosférica. No entanto, um procedimento igualmente importante e indispensável é a calibração dos sensores embarcados nos satélites.

Calibração de sensores orbitais é o processo de ajustar e validar as medições realizadas pelos sensores a bordo de satélites para garantir a precisão e a consistência dos dados em relação a padrões conhecidos, permitindo comparações ao longo do tempo e entre diferentes sensores. Esse procedimento envolve a determinação de coeficientes de calibração que convertem os números digitais das imagens em grandezas físicas, como radiância ou reflectância espectral, assegurando que as medições representem com fidelidade as condições reais da superfície terrestre (SCHOTT, 2007; PONZONI et al., 2015).

A necessidade de calibração dos sensores a bordo de satélites, deve-se ao fato do mesmo sofrer um denominado “estresse” causado primeiramente pelo lançamento, e uma segunda causa é o ambiente espacial ser diferente do ambiente de calibração em laboratório em que o satélite foi construído.

Existem vários métodos de calibração para esses sensores que podem ser realizados antes do lançamento do satélite, em ambiente laboratorial. Outra abordagem é a calibração absoluta, que se baseia em medições de campo realizadas em locais específicos. Além disso, existe a calibração radiométrica cruzada, que envolve a comparação entre dois sensores (PONZONI et al., 2015).

A calibração absoluta é onerosa e envolve incertezas na caracterização da atmosfera e na modelagem da transferência radiativa. Já o método de calibração cruzada consiste em comparar a resposta entre sensores quando estão expostos a uma mesma quantidade de radiação. Este método envolve dois sensores, sendo que um deles é adotado como referência e, por isso, deve estar calibrado (CHANDER, MARKHAM E HELDER, 2009).

Ademais, a calibração cruzada minimiza custos em relação ao método de calibração absoluta já que esta necessita de medidas realizadas em locais de referência, como desertos, ou em outros alvos homogêneos onde se tem conhecimento da quantidade de radiação refletida e emitida (ZANOTTA, FERREIRA E ZORTEA, 2019).

A calibração absoluta de sensores no Brasil tem sido tratada por alguns autores, com destaque para os trabalhos precursores e de referência como os de Ponzoni et al. (2000), Lampareli et al. (2003), Ponzoni et al. (2006), Ponzoni et al. (2008) e Pinto (2011). Além dos pesquisadores brasileiros mencionados, há diversos especialistas internacionais que se destacam na área de calibração absoluta de sensores orbitais, por exemplo, Karki et al. (2023), Chaity et al. (2021), Myers et al. (2024), entre outros.

Para a calibração cruzada destacam-se no Brasil o trabalho intitulado "Calibração Cruzada de Sensores de Observação da Terra", disponível no repositório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o livro "Calibração de Sensores Orbitais" que conta com a contribuição de autores brasileiros renomados na área, como Flávio Jorge Ponzoni, Cibele Teixeira Pinto, Rubens Augusto Camargo Lamparelli, Jurandir Zullo Junior e Mauro Antonio

Homem Antunes. Tais exemplares refletem o empenho da comunidade científica brasileira em aprimorar as técnicas de calibração de sensores orbitais, garantindo a qualidade e a confiabilidade dos dados de sensoriamento remoto. Tratando-se de autores de outros países destacam-se os trabalhos de Thome et al. (2003), Chander et al. (2004) e Teillet et al. (2006).

Neste contexto de calibração de sensores orbitais, existe o denominado *Working Group on Calibration and Validation do Committee on Earth Observation Satellites* (CEOS) que reúne especialistas de diversos países que colaboram para definir metodologias e procedimentos de calibração para sensores de observação da Terra. Para maiores informações sobre o CEOS, acessar < <https://ceos.org/ourwork/workinggroups/wgcv/> >.

Com base no exposto, esta pesquisa consistiu em realizar a calibração cruzada do sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A em relação ao OLI a bordo do satélite Landsat 8. O sensor OLI é utilizado como referência, visto que a agência responsável pelo sistema disponibiliza os dados de calibração e o MUX, o sensor a ser calibrado.

A problemática envolvida nesta pesquisa consistiu em determinar os parâmetros de calibração (radiância máxima (L_{MAX}) e radiância mínima (L_{MIN})) de cada banda espectral do sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A, a partir de uma calibração com base no sensor de referência calibrado OLI a bordo do satélite Landsat 8.

O dado obtido no pixel da imagem bruta dos sensores é o valor de Número Digital (ND). O ND da imagem OLI é convertido para radiância a nível de satélite, que é uma unidade física. Sendo assim, a solução testada foi a calibração cruzada, que consistiu na obtenção da radiância (L) do sensor a ser calibrado em órbita, a partir de dados de sensores já calibrados pelas agências espaciais responsáveis pelo lançamento.

A calibração cruzada foi validada utilizando o espectrorradiômetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution* em medições realizadas na superfície terrestre. Para essa validação, foram coletados dados espectrorradiométricos em uma área considerada aproximadamente homogênea, localizada no campus Seropédica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). A comparação entre os dados de campo e a imagem calibrada do sensor MUX foi realizada após a correção atmosférica da imagem, utilizando o modelo físico 6S. Posteriormente, os resultados foram analisados para avaliar a eficácia do processo de calibração cruzada.

Desta forma, a hipótese da referida pesquisa permeou-se na seguinte questão, a radiância (L) aparente do sensor a ser calibrado pode ser estimada por meio da radiância aparente do sensor de referência para as bandas com a função de resposta normalizada na mesma faixa espectral. As suposições presumidas como verdadeiras para essas hipóteses são:

- a) os sensores de referência estão corretamente calibrados;
- b) a atmosfera não teve variações significativas entre o horário de passagem do sensor de referência, neste caso o sensor OLI do Landsat 8, e o sensor MUX do satélite CBERS-4A; e
- c) a reflectância dos alvos utilizados para obter os coeficientes de calibração variam pouco ao longo das funções de resposta normalizada, fazendo com que não seja necessário fazer correção para a diferença de largura das bandas.

Duas proposições foram importantes para o desenvolvimento dessa pesquisa. A primeira é de que a calibração absoluta pela adição de efeitos atmosféricos aos dados espectrorradiométricos de campo adiciona incertezas na obtenção da radiância aparente que podem ser de mesma ordem ou até maiores do que as incertezas geradas pela diferença de atmosfera entre as passagens dos dois sensores, por serem passagens com diferenças da ordem

de minutos. Nesse mesmo sentido, a segunda proposição é de que para a validação, a incerteza gerada pela correção atmosférica para obter a reflectância da superfície para a reflectância do sensor calibrado é da mesma ordem que a adição de atmosfera aos dados de superfície para obter a reflectância aparente a partir dos dados espectrorradiométricos de campo.

O objetivo geral desta pesquisa foi propor um método de calibração radiométrica cruzada de sensores ópticos orbitais, calibrando o sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A em relação ao sensor OLI do satélite Landsat 8 e validar o resultado desta calibração com dados obtidos na superfície terrestre em uma área homogênea, arada para plantio agrícola, com o espectrorradiômetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution*.

E os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) determinar os parâmetros de calibração para o sensor MUX do satélite CBERS-4A utilizando os valores de radiância do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8 como referência;
- b) realizar a correção atmosférica aplicando o modelo físico 6S nas imagens de reflectância aparente do sensor MUX do satélite CBERS-4A;
- c) validar a calibração radiométrica cruzada utilizando dados coletados em campo com um espectrorradiômetro; e
- d) comparar os resultados de reflectância da superfície da área de validação com outros sensores (LandSat 8 e Sentinel 2A) obtidos sob as mesmas condições da imagem MUX utilizada na validação.

Para a apresentação da metodologia proposta, bem como, dos resultados obtidos, a estrutura da tese foi organizada em 5 Capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Material e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões e Considerações Finais.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do tema abordado na tese, descrevendo a sua relevância para a comunidade acadêmica e para o meio científico, além de um breve estado da arte a respeito da calibração de sensores orbitais e sua importância; a hipótese da pesquisa que foi a motivação dos estudos; o objetivo geral e os objetivos específicos, além da justificativa e da viabilidade da pesquisa proposta.

Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o entendimento teórico-prático da calibração de sensores orbitais, tema central desta pesquisa. São discutidos conceitos de SR, bem como as principais características e informações técnicas dos programas CBERS e Landsat 8, com ênfase nos sensores empregados na calibração cruzada. Adicionalmente, descreve-se o espectrorradiômetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution* utilizado na validação da metodologia proposta, destacando suas principais características. O capítulo também aborda os conceitos relacionados à calibração de sensores orbitais e às correções atmosféricas aplicadas às imagens obtidas em campo.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para a execução da pesquisa, detalhando as áreas de estudo, os materiais e os métodos empregados. A pesquisa foi conduzida em duas áreas distintas. A primeira etapa consistiu na determinação dos parâmetros de calibração, e foi realizada na região do Salar de Uyuni, o maior deserto de sal do mundo, localizado na Bolívia. A segunda área de estudo está localizada no entorno do Instituto de Geociências da UFRRJ, no campus de Seropédica. E foi utilizada na etapa de validação da calibração dos sensores orbitais do CBERS-4A. Adicionalmente, são detalhadas as imagens utilizadas, tanto dos sensores de referência quanto do sensor a ser calibrado, além do espectrorradiômetro empregado na

validação dos dados coletados em campo. Uma vez que a pesquisa se concentra na calibração cruzada dos sensores orbitais do CBERS-4A em relação ao Landsat 8.

No Capítulo 4 são descritos os resultados e as discussões acerca da viabilidade da pesquisa, e da proposta metodológica para a determinação dos parâmetros de calibração cruzada de sensores orbitais multiespectrais corrigidos dos efeitos atmosféricos, além de sua validação com dados de campo obtidos com espectrorradiômetros e posterior comparação com outros sensores (LandSat 8 e Sentinel 2A) obtidos sob as mesmas condições da imagem MUX utilizada na validação.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e considerações finais da pesquisa realizada e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípios da Radiometria

O mapeamento da superfície terrestre e o estudo dos recursos naturais, sejam hídricos, minerais, energéticos ou outros, renováveis ou não, sempre despertaram o interesse humano, desde os tempos mais remotos até os dias atuais. Com os avanços tecnológicos e o advento dos satélites artificiais, essas áreas de estudo têm se expandido significativamente, uma vez que novas tecnologias permitem a obtenção de informações confiáveis de forma global, e em algumas situações, em tempo real. Esse progresso oferece suporte à tomada de decisões sustentáveis no uso dos recursos naturais, com o intuito de preservar o futuro do planeta e das próximas gerações.

Neste contexto destaca-se o Sensoriamento Remoto (SR) cujas primeiras definições datam da década de 70, concomitantemente, com o início da era espacial, isto é, com o lançamento dos primeiros satélites artificiais, a qual define esta tecnologia como sendo: “arte ou ciência de obter informações sobre um objeto sem tocá-lo (FISCHER *et al.*, 1976, p. 34)”. Ou ainda: “aquisição de dados físicos de um objeto sem toque ou contato (LINTZ E SIMONETT, 1976, p. 191)”. Entretanto, esta tecnologia, já havia sido explicitada, por Colwell (1966), com a definição do termo “detecção remota” como sendo um reconhecimento à distância, que de certo modo, já traduz, de uma forma ampla, o que é o SR na prática.

O SR foi formalmente definido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) como a medição ou aquisição de informação de alguma propriedade de um objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro (sistemas sensores) que não esteja em contato físico com o objeto ou fenômeno em estudo (COLWELL, 1983).

De um modo geral, os instrumentos utilizados em SR, comumente chamados de sensores, registram a Radiação Eletromagnética (REM), podendo também ser utilizados outros tipos de campos de força, como por exemplo, as ondas acústicas (sonar) (JENSEN, 2009). Esses sensores são sistemas capazes de detectar e registrar, na forma de imagem, o fluxo de energia radiante refletido ou emitido por objetos da superfície terrestre obtendo informações muito específicas sobre um objeto ou extensão de fenômeno geográfico.

Considerando os sensores que registram as REM refletida, estes podem ser categorizados de acordo com a amplitude e número de faixas espectrais que são registradas, sendo denominados de radiômetros, espectrorradiômetro ou sensores ópticos.

Uma etapa precursora ao entendimento do processo de detecção e registro da energia radiante na forma de imagem pelo sensor, é a distinção dos conceitos de radiometria e espectrorradiometria. Radiometria é a ciência e a medição da energia radiante (incluindo a região do visível, ultravioleta e infravermelho) em termos de potência absoluta. A radiometria é o conjunto das técnicas utilizadas para a medida das quantidades de energia radiante e os sistemas utilizados para a medida dessas quantidades são denominados radiômetros. As quantidades relacionadas com a energia radiante que podem ser medidas são denominadas grandezas radiométricas (STEFFEN E MORAES, 1993).

Já a espectrorradiometria, consiste na técnica de análise espectral que possibilita medir as intensidades energéticas da radiação eletromagnética antes e depois da mesma ter interagido com os materiais terrestres e por meio da qual se tem a compreensão para interpretar as imagens de SR (MENESES, ALMEIDA E BAPTISTA, 2019). A espectrorradiometria é uma técnica de quantificação pontual de energia refletida por alvos de interesse, mensurando valores de radiação em determinados comprimentos de onda e que são convertidos em reflectância. Os

dados obtidos com análises espectrorradiométricas fornecem subsídios matemáticos para interpretação de imagens orbitais (CARNEIRO et al., 2019).

Anteriormente, ao contato com o objeto na superfície, parte da REM incidente ao atingir a atmosfera, pode sofrer dois efeitos, espalhamento e absorção. Logo a energia refletida ou emitida por um objeto na superfície que será detectada e registrada pelo sensor orbital estará contaminada deste efeito (PONZONI E SHIMABUKURO, 2010 e PONZONI et al., 2015). Adicionalmente, a REM sofre alterações devido ao ângulo e direção de incidência e da composição atmosférica (LORENZZETTI, 2015).

Ao atravessar as camadas da atmosfera e entrar em contato com os objetos, a interação da REM com os mesmos pode ocorrer de três maneiras distintas, sendo elas: a transmissão, quando a REM atravessa o objeto; absorção quando a REM é absorvida pelo objeto; e a reflexão, sendo esta a parte de interesse na maioria dos estudos, quando a REM é refletida e registrada pelo sensor a bordo dos satélites (PONZONI et al., 2015; BARBOSA et al., 2019; ZANOTTA, FERREIRA E ZORTEA, 2019).

A magnitude da radiação eletromagnética (L) registrada, dentro de um *Instantaneous Field Of View* (IFOV), de um sistema óptico. De acordo com Novo (2010) o IFOV define a área do terreno vista pelo sensor a uma dada altitude e a um determinado tempo. O IFOV representa, portanto, o tamanho do pixel da imagem, o qual corresponde com a dimensão da área vista pelos sensores.

O conteúdo de informação de uma imagem é dado em função das resoluções do sensor utilizado na coleta de dados. As resoluções são denominadas de espectral, espacial, radiométrica e temporal e suas definições de forma sucinta consistem em (BARBOSA et al., 2019).

2.2 Grandezas Radiométricas

A radiação refletida pelos objetos na superfície terrestre resulta da interação entre a radiação solar e as características físicas, químicas e biológicas desses objetos. Essas interações determinam o comportamento espectral dos materiais, visível nas imagens captadas por sensores remotos em diferentes comprimentos de onda.

Para compreender melhor como a energia radiante interage com os objetos terrestres, é essencial quantificar tanto as causas quanto os efeitos desse fenômeno. Isso implica avaliar as quantidades de energia radiante considerando sua distribuição ao longo do tempo, em diferentes áreas e em distintos comprimentos de onda, conhecidas como grandezas radiométricas.

As medidas relacionadas à energia radiante são denominadas grandezas radiométricas, das quais a energia radiante é a mais fundamental. A partir dela, derivam-se outras grandezas importantes, como o fluxo radiante, a irradiância e a radiância, que descrevem diferentes aspectos da interação entre a energia radiante e os objetos, sendo amplamente utilizadas em estudos de sensoriamento remoto e análise de materiais. (STEFFEN E MORAES, 1993; LORENZZETTI, 2015; BARBOSA et al., 2019). Maiores detalhes sobre cada grandeza podem ser observados a seguir:

- a) Energia Radiante (Q): é a quantidade de energia transportada por um campo de radiação e cuja unidade é o Joule (J). Dado que cada fóton é um pacote com uma certa quantidade de energia, a energia total, que está se propagando, e é composta por fótons de diferentes comprimentos de onda, é a soma da energia de todos os fótons que passam por um certo referencial em um certo período de tempo Δt , de acordo com a Equação 1.

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i \xi(\lambda_i) \quad (1)$$

Onde N_i é o número de fótons no comprimento de onda λ_i e $\xi(\lambda_i)$ é a energia do fóton em um determinado comprimento de onda.

A Figura 1, de acordo com Barbosa et al. (2019), representa simplificada a energia radiante (Q), onde as setas representam fótons de diferentes quantidades de energia $\xi(\lambda_i)$. A elipse representa o referencial onde está sendo feita a medida e pode ser considerada como a superfície do detector de medida de energia radiante.

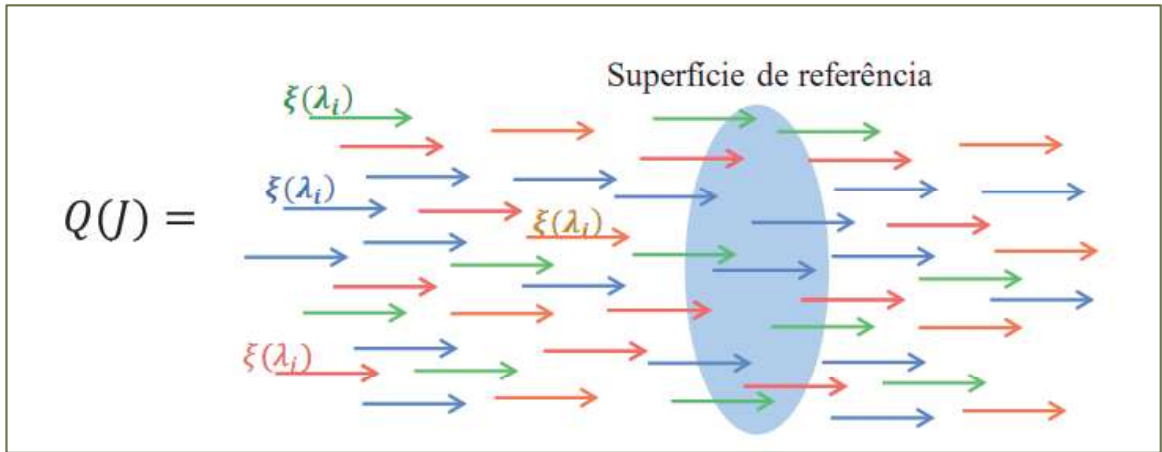


Figura 1: Campo de luz formado por fótons de distintos comprimentos de onda (λ_i).

Fonte: Adaptado de Barbosa et al. (2019).

- b) Fluxo Radiante (ϕ): é a quantidade total de energia radiante emitida, refletida, transmitida ou recebida por unidade de tempo. Ele descreve a transferência de energia pela radiação eletromagnética ao se propagar pelo espaço, sendo medido em J/s (Joules/segundo) ou W (Watt). Também, pode ser definido pela taxa de fluxo de energia radiante que passa por um ponto ou seção transversal de referência por unidade de tempo t e é expressa pela Equação 2.

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (2)$$

onde ΔQ é a variação da energia radiante em Joules e Δt o intervalo de tempo em segundos.

- c) Irradiância (E): é a razão entre o fluxo radiante que incide em uma amostra de superfície e a área dessa amostra, isto é, a densidade ou taxa do fluxo radiante interceptado por unidade de área (dA) e é medida em W/m^2 e definida pela Equação 3.

$$E = \frac{\Delta \phi_{incidente}}{\Delta A} \quad (3)$$

onde $\Delta \phi_{incidente}$ é o fluxo radiante em W e ΔA é a unidade de área em m^2 .

Semelhante ao conceito de irradiância (E) tem-se a exitância (M) entretanto, esta por sua vez, é a razão entre fluxo radiante refletido que deixa uma amostra de superfície e a área dessa amostra e é medida em W/m², definida pela Equação 4.

$$M = \frac{\Delta\phi_{\text{emanente}}}{\Delta A} \quad (4)$$

onde $\Delta\phi_{\text{emanente}}$ é o fluxo radiante em W e ΔA é a unidade de área em m².

A irradiância e a exitância diferem apenas com relação ao sentido dos fluxos envolvidos na sua determinação adicionalmente, nenhuma referência é feita à distribuição espacial desses fluxos, valendo, portanto, para a determinação da irradiância ou da exitância todo o fluxo contido num dos hemisférios determinados pelo plano da amostra.

- d) Radiância (L): possibilita quantificar e descrever a propagação da luz no espaço tridimensional. Existem dois conceitos importantes para entender a radiância: ângulo sólido e intensidade radiante.

O ângulo sólido é uma extensão do ângulo plano. O setor de uma esfera delimitado por um conjunto de direções que determinam uma área A na superfície da esfera (Figura 2) define um ângulo sólido (Ω) como a razão da área (A) pelo raio (r) ao quadrado, cuja unidade é esferorradiano (sr).

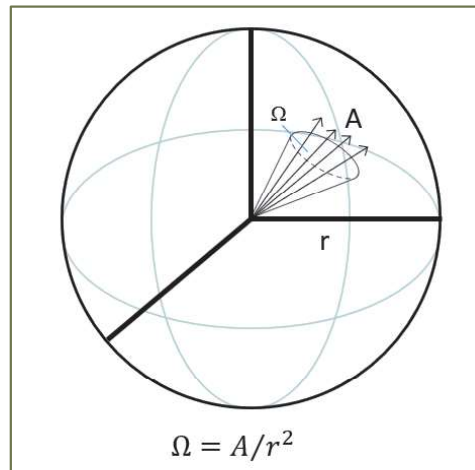


Figura 2: Geometria associada a definição de ângulo sólido Ω .

Fonte: Adaptado de Barbosa et al. (2019).

A Intensidade Radiante (I) é uma medida do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido em uma certa direção. De posse de uma fonte de radiação pontual, localizada no centro de uma esfera de raio r, emitindo radialmente em todas as direções e considerando um cone que subtende um ângulo sólido Ω e com seu vértice na fonte de radiação (Figura 3A). A intensidade radiante pode também ser usada para descrever a radiação em um ponto no espaço ou incidente em um ponto de um alvo (Figura 3B).

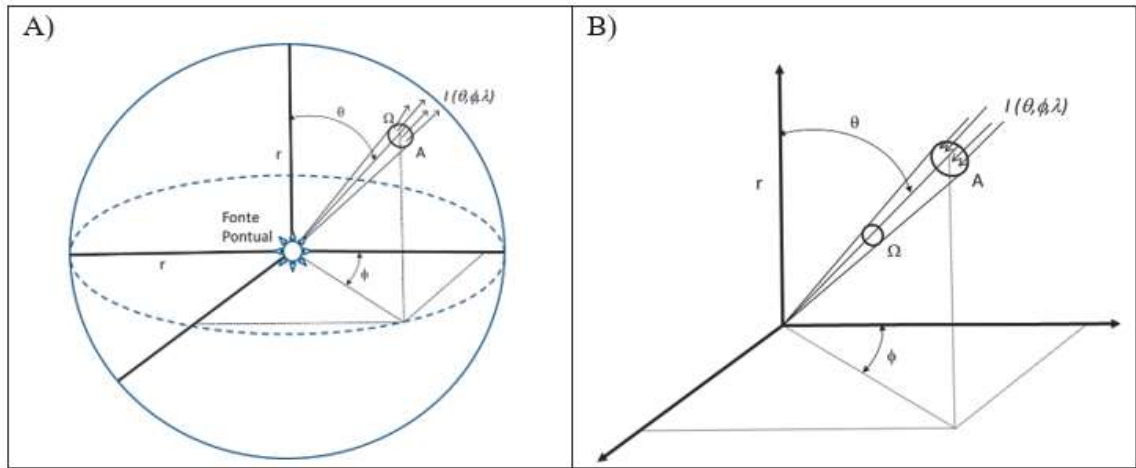


Figura 3: Ilustração da intensidade radiante (I) no ângulo sólido (Ω) na direção do ângulo zenital (θ) e azimutal (ϕ). (A) radiação emergindo de uma fonte pontual; (B) radiação em um ponto do espaço ou incidindo num ponto de um alvo.

Fonte: Adaptado de Barbosa et al. (2009).

Com base no exposto nos parágrafos precedentes a intensidade radiante é definida pela razão entre o fluxo radiante ($\Delta\phi$) contido em um ângulo sólido com origem na fonte e as dimensões desse ângulo sólido ($\Delta\Omega$) e é medida em W/sr (Watt/esferorradiano), definida pela Equação 5.

$$I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\Omega} \quad (5)$$

A intensidade radiante pode também ser usada para descrever a radiação em um ponto no espaço ou incidente em um ponto de um alvo. O conceito de intensidade radiante está associado à medida do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido, proveniente de uma fonte pontual ou incidente num ponto de um alvo.

A radiância de uma amostra de superfície, numa determinada direção, é a razão entre o fluxo radiante refletido (ou emitido) por unidade de área projetada e por unidade de ângulo sólido na direção considerada e é medida em W/m²sr, definida pela Equação 6.

$$L = \frac{\Delta\phi}{\Delta A \Delta\Omega \cos\theta} \quad (6)$$

A radiância é uma grandeza direcional e corresponde à sensação visual de brilho da amostra de superfície. Quando a radiância de uma amostra de superfície não varia com a direção, a superfície é denominada Lambertiana (difusor perfeito).

A Figura 4 sintetiza a hierarquia das grandezas radiométricas e a Figura 5 exemplifica os componentes radiométricos da trajetória da REM, da fonte ao sensor.

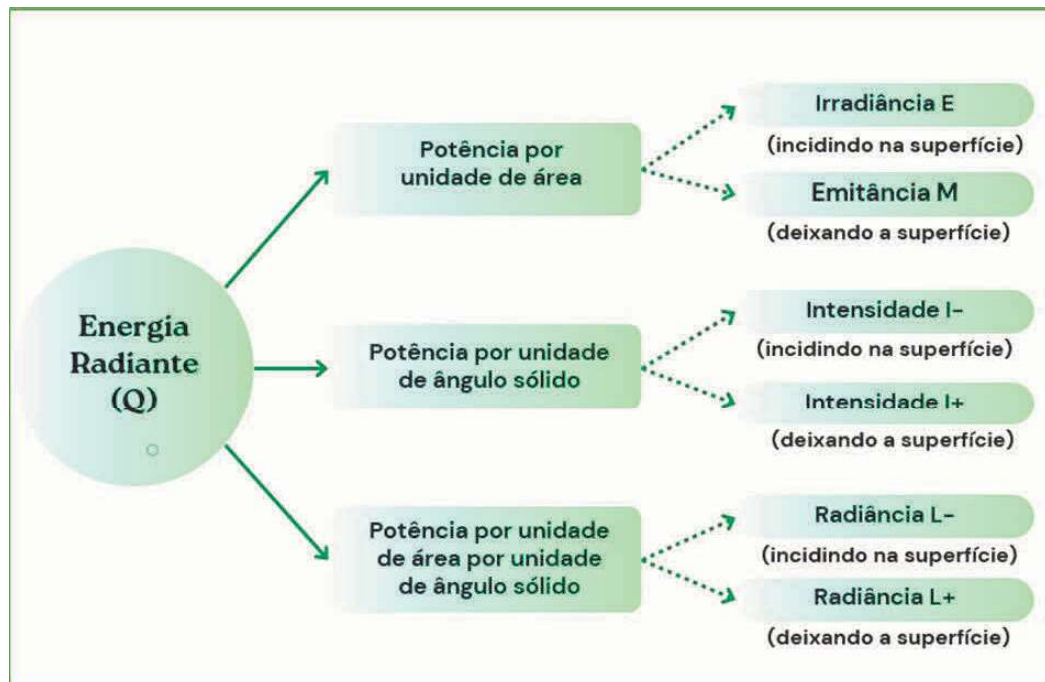


Figura 4: Hierarquia dos conceitos radiométricos.

Fonte: Adaptado de Mobley (1994).

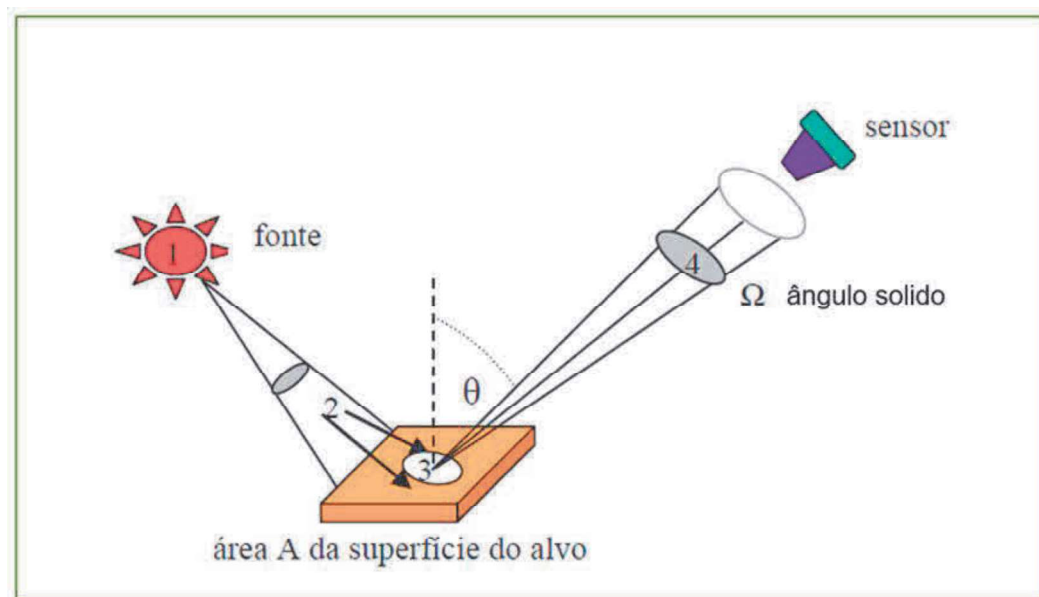


Figura 5: Componentes radiométricos. (1) Energia Radiante; (2) o Fluxo Radiante; (3) Irradiância; e (4) Radiância.

Fonte: Meneses e Almeida (2012).

2.3 Relação entre Grandezas Radiométricas

2.3.1 Interação entre a radiação e o objeto

Um fluxo radiante em uma dada faixa bem estreita de comprimento de onda ao interagir com um objeto parte dele será refletido, parte absorvido e parte transmitido e neste caso, os fluxos resultantes têm valores que dependem das propriedades do objeto (LORENZZETTI, 2015).

A transmissividade caracteriza a capacidade de um meio de permitir a passagem de energia radiante através dele. É definida como a razão entre o fluxo radiante transmitido pelo meio e o fluxo radiante incidente sobre ele. Essa grandeza é adimensional e varia de 0 (opaco) a 1 (completamente transparente), conforme Equação 7 (LORENZZETTI, 2015):

$$\tau_{\lambda} = \frac{M_{\tau\lambda}}{E_{\tau\lambda}} \quad (7)$$

De modo que os fluxos incidentes e os emanentes, relativos a uma área A, E e M, eles serão dados por (Equação 8, 9 e 10):

$$E_{i\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}}{A} \quad (8)$$

$$M_{\tau\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}^t}{A} \quad (9)$$

e

$$\tau_{\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}^t}{\phi_{\lambda}} \quad (10)$$

Como M e E têm a mesma unidade (Wm^{-2}), a transmitância é adimensional. E o fluxo transmitido é sempre menor que o incidente ($\tau_{\lambda} \leq 1$).

De maneira semelhante, segundo Lorenzzetti (2015), a refletividade representa a capacidade de o meio redirecionar o fluxo, ou parte dele, para o mesmo hemisfério de onde veio. Sendo assim, define-se reflectância (r ou ρ) de um meio como a razão entre a exitância radiante na posição onde incide o fluxo radiante e a irradiância incidente, conforme a Equação 11.

$$r_{\lambda} = \frac{M_{r\lambda}}{E_{i\lambda}} \quad (11)$$

Com M dado pela Equação 12:

$$M_{r\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}^r}{A} \quad (12)$$

E r_{λ} conforme a Equação 13:

$$\rho = r_{\lambda} = \frac{\phi_{\lambda}^r}{\phi_{\lambda}} \quad (13)$$

Da mesma maneira que para a transmitância, a reflectância é adimensional e $r_\lambda \leq 1$.

A absorptividade é a capacidade do meio remover fótons, ou parte da energia associada ao fluxo radiante que propaga num meio qualquer, convertendo-o em outra forma de energia, por exemplo, calor. Logo, tem-se que a absorbância (a), Equação 14, que é a razão entre o fluxo radiante por unidade de área $M_{\alpha\lambda}$, convertido em outra forma de energia, e a irradiância incidente, também adimensional (LORENZZETTI, 2015).

$$a_\lambda = \frac{M_{\alpha\lambda}}{E_{i\lambda}} = \frac{\phi_\lambda^\alpha}{\phi_\lambda} \quad (14)$$

A lei de conservação da energia, dada pela Equação 15:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (15)$$

e, normalizando em relação ao fluxo incidente tem-se a Equação 16:

$$1 = \rho + a + \tau \quad (16)$$

onde as razões adimensionais ρ, a e τ são denominadas reflectância, absorbância e transmitância e consideradas propriedades radiométricas do objeto analisado.

Um resumo das grandezas radiométricas pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1: Grandezas radiométricas.

Grandeza	Símbolo	Equação	Unidade de medida	Conceito
Energia Radiante	Q	$Q = \sum_{i=1}^n N_i \xi(\lambda_i)$	Joules (J)	Energia transportada na forma de ondas eletromagnéticas ou fótons
Fluxo Radiante	ϕ	$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$	Watt (W)	Taxa de variação de energia no tempo
Irradiância	E	$E = \frac{\Delta \phi_{incidente}}{\Delta A}$	Watt por metro quadrado (Wm^{-2})	Fluxo incidente sobre uma superfície por unidade de área
Excitância ou Emitância	M	$M = \frac{\Delta \phi_{emanante}}{\Delta A}$	Watt por metro quadrado (Wm^{-2})	Fluxo deixando uma superfície por unidade de área
Intensidade Radiante	I	$I = \frac{\Delta \phi}{\Delta \Omega}$	Watt por esferorradiano (Wsr^{-1})	Fluxo radiante deixando uma fonte por unidade de ângulo sólido numa direção especificada
Radiância	L	$L = \frac{\Delta \phi}{\Delta A \Delta \Omega \cos \theta}$	Watt por esferorradiano por metro quadrado ($Wsr^{-1}m^{-2}$)	I por unidade de área normal à fonte, numa dada direção

Grandeza	Símbolo	Equação	Unidade de medida	Conceito (cont.)
Emissividade	ε	$\varepsilon = \frac{M}{Mb_0}$	Adimensional	Razão entre a excitância de um material e a excitância do corpo negro (b_0)
Absorbância	α	$a_\lambda = \frac{\phi_\lambda^\alpha}{\phi_\lambda}$	Adimensional	Razão entre o fluxo absorvido (ϕ_λ^α) e o fluxo incidente (ϕ_λ) sobre a superfície
Reflectância	ρ	$\rho = \frac{\phi_\lambda^r}{\phi_\lambda}$	Adimensional	Razão entre o fluxo refletido (ϕ_λ^r) e o fluxo incidente (ϕ_λ) sobre a superfície
Transmitância	τ	$\tau_\lambda = \frac{\phi_\lambda^t}{\phi_\lambda}$	Adimensional	Razão entre o fluxo transmitido (ϕ_λ^t) e o fluxo incidente (ϕ_λ) sobre a superfície

Fonte: Adaptado de Slater (1980).

2.4 Calibração de Sensores Orbitais

As imagens advindas dos sensores ópticos do SR têm sido cada vez mais aplicadas nos estudos relacionados às informações existentes e ao monitoramento de fenômenos que ocorrem na superfície da Terra, seja por questões de preservação ambiental ou até mesmo de previsão do tempo. Entretanto, para que estes estudos possam ter viabilidade, estes dados devem ser consistentes com relação a estas informações que estão sendo imageados, sendo o mais próximo possível do real.

Neste contexto, para garantir a detecção e quantificação das informações na superfície terrestre por meio de sensores orbitais faz-se necessário realizar a calibração radiométrica dos sensores, com o objetivo de converter o Número Digital (ND) das imagens em valores físicos, como radiância ou reflectância (CHANDER; MEYER E HELDER, 2004).

Quando os sensores registram as intensidades da REM, produzem um sinal proporcional à variação da intensidade do fluxo radiante incidente no sistema sensor, que é então quantificado em valores discretos inteiros, denominado ND (PONZONI et al., 2006). Cada ND está associado a um nível de cinza da imagem, que indica um brilho diferente da superfície. Essa quantização do número de níveis de cinza é expressa em função do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar o valor do nível máximo, sendo este valor uma potência de 2 (dois). Em geral a quantização do sinal está diretamente associada à qualidade da informação gerada pelo sensor, ou seja, sistemas sensores de baixa quantização podem perder informações (PONZONI et al., 2015).

Os NDs, no entanto, não representam as unidades físicas, como por exemplo, a radiância proveniente dos objetos da superfície terrestre e, portanto, o ND de um determinado sensor não tem relação com o ND de outro sensor (CHANDER et al., 2013a). Quando se utiliza estes valores para caracterizações espectrais, associação de informações de sistema sensores com as propriedades físico-químicas ou a comparação de dados dos diferentes sensores, é necessária a conversão destes NDs para valores de grandezas físicas. Para tanto, é realizada a calibração do sensor, que consiste em obter os coeficientes que determinarão a transformação dos NDs em radiância (PONZONI et al., 2015; BARBOSA et al., 2019).

Para a calibração de sensores remotos podem ser utilizados os seguintes métodos (DINGUIRARD E SLATER, 1999; ANTUNES E TAVARES JÚNIOR, 2005):

- em laboratório antes do lançamento;
- pós-lançamento, por instrumento a bordo do satélite;

- c) calibração absoluta ou vicária; e
- d) calibração cruzada.

A primeira calibração de sensores imageadores ocorre em laboratório antes de seu lançamento. Estes dados são inseridos no sistema de transformação analógico-digital e são também utilizados pelos usuários para transformar as imagens em grandezas físicas. Após o lançamento do sensor, na fase de validação dos dados são feitas avaliações para verificar se as imagens obtidas por meio dos coeficientes da calibração de laboratório se mantêm. Caso sejam encontrados erros na calibração, é realizada uma nova calibração com o sensor agora em órbita. Slater et al. (2001) explicitam que a calibração em órbita pode ser feita com o uso de lâmpadas padrão, realizando medidas de radiação solar ou por meio de medidas de reflectância na superfície (THOME, 2001, HU et al., 2001, TEILLET et al., 2001).

A calibração absoluta, de acordo com Chander, Markham e Helder (2009), é onerosa e envolve incertezas na caracterização da atmosfera e na modelagem da transferência radiativa. Já o método de calibração cruzada consiste em comparar a resposta entre sensores quando estão expostos a uma mesma energia radiante. Este método envolve dois sensores, sendo que um deles é adotado como referência e, por isso, deve estar calibrado, como exemplo da Figura 6.

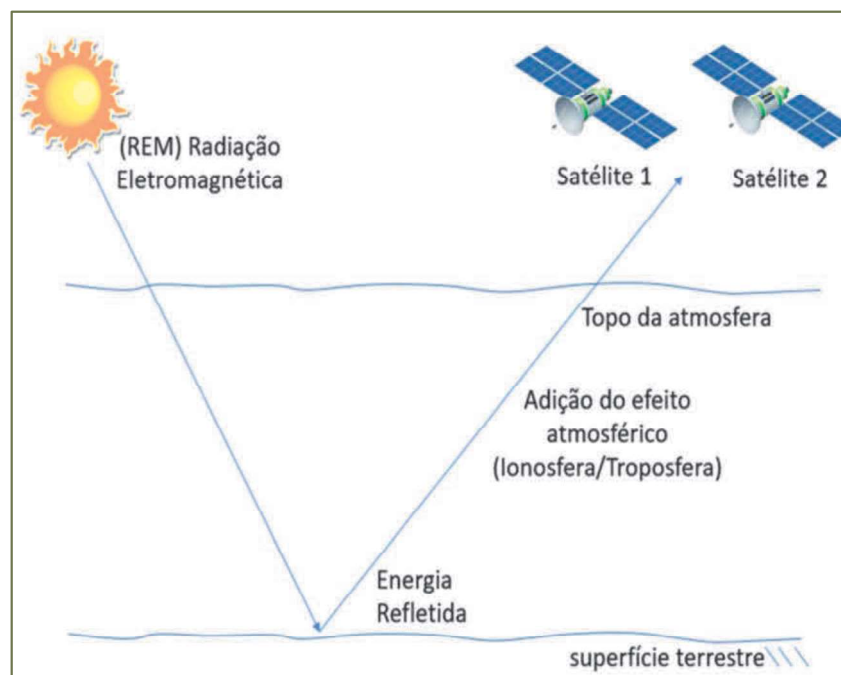


Figura 6: Método de calibração cruzada.

Fonte: O Autor (2024).

Adicionalmente, a calibração cruzada apresenta uma redução significativa de custos em comparação ao método de calibração absoluta. Este último requer medições realizadas em locais de referência considerados ideais, como desertos ou outros alvos homogêneos, onde se possui conhecimento prévio das propriedades de reflexão e emissão da radiação. A calibração absoluta, portanto, depende de levantamentos de campo, o que aumenta sua complexidade logística e financeira (ZANOTTA, FERREIRA E ZORTEA, 2019).

Segundo Teillet et al. (2001), embora os erros possam chegar até a $\pm 6\%$, os métodos de calibração baseados em outros sensores é de fácil implementação e permite a utilização de imagens já coletadas pelo sensor a ser calibrado e pelo sensor em que a calibração vai se basear.

Uma desvantagem do método é a dificuldade de se obter imagens em um curto espaço de tempo e sob as mesmas condições da superfície, de iluminação e de atmosfera.

A calibração radiométrica, independentemente do método aplicado, consiste em determinar os coeficientes ou fatores de calibração, que possibilitam a conversão dos ND de cada banda da imagem registrada pelo sensor em radiância (L). Esse processo envolve a aplicação de equações de ajuste, utilizando coeficientes obtidos nos metadados da imagem ou fornecidos pela entidade responsável pelo satélite.

Geralmente, os desenvolvedores disponibilizam os parâmetros de calibração de duas formas principais: a primeira por meio dos valores de ganho e *offset* (intercepto); e a segunda, informando os valores de radiância mínima (L_{\min}) e máxima (L_{\max}) da banda espectral. Esses parâmetros são fundamentais para a conversão precisa dos dados brutos em valores físicos, como descrito por Zanotta, Ferreira e Zortea (2019).

Em se tratando de uma relação linear, a conversão entre ND e radiância (L) a partir dos valores de ganho e *offset* pode ser realizado pela Equação 17 (ZANOTTA, FERREIRA E ZORTEA, 2019):

$$ND = aL + b \quad (17)$$

Em que o coeficiente angular (a) é o ganho e o coeficiente linear (b) da equação da reta é o *offset*. Isolando o L, que se trata da radiância de interesse, tem-se (Equação 18):

$$L = \frac{ND - b}{a} \quad (18)$$

A segunda forma de transformação de ND utilizando os valores máximos e mínimos de radiância para cada banda (L_{λ}) de uma imagem, é representada pela Equação 19 (PONZONI *et al.*, 2015; ZANOTTA, FERREIRA E ZORTEA, 2019):

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\lambda \max} - L_{\lambda \min}}{ND_{\lambda \max} - ND_{\lambda \min}} * (ND - ND_{\min}) + L_{\lambda \min} \quad (19)$$

Onde: $L_{\lambda \max}$ e $L_{\lambda \min}$ são a radiância máxima e mínima expressas em $Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ para o sensor e banda em questão e $ND_{\lambda \max}$ e $ND_{\lambda \min}$ são os números digitais máximo e mínimo utilizados na conversão analógico-digital. Os ND são definidos em função da resolução radiométrica do sensor a bordo do satélite, por exemplo para o CBERS-4, com resolução de 8 bits estes valores mínimo e máximo são respectivamente, 0 e 255.

Obtida a radiância, a próxima etapa é a determinação da reflectância, entretanto, esta trata-se da chamada reflectância aparente ou reflectância no topo da atmosfera, do inglês *Top of the Atmosphere* (TOA), sendo uma mistura do sinal da atmosfera e da superfície, sendo ela calculada a partir da radiância utilizando a Equação 20 (ANTUNES *et al.*, 2003; PINTO; PONZONI E CASTRO, 2013):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{E_{sol\lambda} * \cos \theta_s} \quad (20)$$

Onde: π é o ângulo sólido do hemisfério projetado (sr); ρ_{λ} é a reflectância planetária ao nível do satélite; L_{λ} é a radiância espectral na abertura do sensor em $W \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$; d é a distância do Sol à Terra em unidades astronômicas; $E_{sol\lambda}$ é a irradiância solar média espectral fora da atmosfera em $W \text{ m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$; θ_s é o zênite solar no pixel da imagem em questão. Para simplificação em geral utiliza-se o zênite solar do centro da imagem.

Todo o processo de calibração, após sua conclusão, deve passar por uma avaliação com relação ao resultado obtido, visto que todo processo realizado, envolve medidas, que foram realizadas com a influência de um observador, apto a cometer erros, utilizando equipamentos, suscetíveis a ocorrência de erros, além do fato de que as amostras, são coletadas na maioria dos casos, em diferentes condições ambientais e meteorológicas, afetando as medidas e propagando incertezas, as quais devem ser divulgadas aos usuários, para garantir a confiabilidade das informações.

2.5 Correção Atmosférica

A correção atmosférica é um procedimento necessário em estudos de Sensoriamento Remoto com foco nas propriedades físicas, químicas e biológicas de alvos, pois permite a obtenção dos valores de reflectância a nível de superfície. Em abordagens multitemporais e/ou multisensor, a correção atmosférica é fundamental para a obtenção de medidas de reflectância de superfície representativas das características espectrais dos alvos (GAIDA et al., 2020).

A radiação eletromagnética emitida pelo Sol, ao transpor a atmosfera, sofre diferentes alterações ocasionadas pela sua interação com partículas e moléculas de gás em suspensão na atmosfera. Trata-se de um processo seletivo que é dependente da composição da própria atmosfera e dos comprimentos de onda da radiação incidente, sendo o espalhamento e a absorção os principais fenômenos resultantes (HILKER, 2018).

A atmosfera absorve ou espalha a radiação eletromagnética de forma diferenciada em função dos seus comprimentos de onda e do tamanho das partículas. As partículas presentes na atmosfera, como aerossóis, poeiras, moléculas de diversos gases com diferentes tamanhos interferem na radiação que chega aos alvos terrestres ou ao sensor. Ou seja, a energia eletromagnética ao atingir a atmosfera é por esta espalhada, e parte desta energia espalhada retorna para o espaço, vindo a contaminar a energia refletida ou emitida pela superfície e que é detectada pelos sensores orbitais (PONZONI et al., 2015; WELTER et al., 2020).

As interferências causadas pela interação da REM refletida por um alvo com a atmosfera, quando este é visualizado do espaço, podem ocorrer na forma de espalhamento e absorção (NOVO, 2010). Existem três formas de espalhamentos: Rayleigh, Mie e não-seletivo. O espalhamento Rayleigh é produzido pelas partículas de gases constituintes da atmosfera cujos diâmetros são menores que o comprimento de onda (λ) da radiação. O espalhamento, denominado Mie, provocado pelos aerossóis, que são partículas sólidas da atmosfera como a fumaça e a poeira, ocorre quando o diâmetro das partículas presentes na atmosfera é aproximadamente igual ao λ da radiação. E o espalhamento não-seletivo, provocado por gotículas de água na forma líquida, ocorre quando o diâmetro das partículas espalhadoras é muito maior que os comprimentos de onda, neste caso a REM de diferentes comprimentos de onda será espalhada com igual intensidade.

A correção atmosférica visa estimar o valor da reflectância de um pixel a nível de superfície. Diversos métodos para correção dos efeitos atmosféricos são encontrados na literatura. Duas principais abordagens para as correções atmosféricas das imagens dos sensores remotos, amplamente utilizadas por diversos autores, envolvem transformações empíricas e modelos de transferência radiativa. A abordagem empírica utiliza uma metodologia baseada em informações coletadas na própria imagem, como a subtração de um valor obtido do objeto mais escuro da imagem (CHAVEZ, 1988). No entanto, apesar da simplicidade e facilidade na sua aplicação, esta metodologia é a menos acurada para a correção atmosférica de imagens (MORAN et al., 1992; MATTHEW et al., 2002; RUMORA et al., 2020; WELTER et al., 2020). A abordagem fundamentada na transferência radiativa por meio da atmosfera considera as características atmosféricas no momento de obtenção da imagem para o cálculo dos fluxos necessários para a obtenção da reflectância bidirecional da superfície. Por isso é considerada uma metodologia fisicamente consistente (ANTUNES et al., 2012).

Os métodos empíricos são simples e tendem a ser menos precisos, tendo como base a estimativa grosseira de parâmetros atmosféricos a partir da resposta espectral de alvos específicos da cena (por exemplo, corpos d'água ou áreas sombreadas). Podem utilizar também o valor mínimo dos histogramas de cada banda como uma forma de minimizar os efeitos aditivos do espalhamento atmosférico. Uma vantagem deste tipo de método refere-se à ausência da necessidade de aquisição de informações de fontes externas, referentes aos parâmetros atmosféricos do momento da aquisição da imagem. Por outro lado, são menos precisos do que os métodos físicos. O método *Dark Object Subtraction* (DOS), proposto por Chavez (1988), é um exemplo de método empírico de correção atmosférica que deve ser utilizado apenas quando não for possível utilizar métodos físicos (SANTOS et al., 2017; GAIDA et al., 2020).

Os métodos físicos de correção atmosférica, também conhecidos como correção absoluta, utilizam medidas ou estimativas físicas de parâmetros atmosféricos para a correção das imagens usando equações diferenciais e integrais. Os algoritmos utilizados normalmente se baseiam em códigos de transferência radiativa, que simulam a propagação da radiação eletromagnética pela atmosfera, como o *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S) (Vermote et al., 1997) e nas compilações do código *MODerate resolution atmospheric TRANsmission* (MODTRAN) (BERK et al., 2016). Exemplos deste último caso incluem os algoritmos *Atmospheric CORrection Now* (ACORN), *Atmospheric/ Topographic CORrection* (ATCOR) (Richter e Schlöpfer, 2015) e o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (COOLEY et al., 2002). Na prática, estes algoritmos facilitam a correção atmosférica por meio da disponibilidade de uma interface gráfica, podendo utilizar para a modelagem atmosférica, dependendo da resolução espectral do sensor, informações da própria imagem e dos metadados fornecidos aos usuários (GAIDA et al., 2020).

O modelo 6S é uma modificação melhorada do método *Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum* (5S) e foi desenvolvido por Vermote et al. (1997), para simular a radiância que chega nos sensores em faixas espectrais entre 0,25 μ m a 4,00 μ m, com o objetivo de determinar as características dos sensores. Sendo assim, de acordo com Antunes et al. (2012), pode-se conseguir o valor de radiância que sai do alvo em direção ao sensor, através da reflectância do alvo e da irradiância. Por isso é necessário que haja informações sobre parâmetros da atmosfera local no horário de aquisição das imagens, proporcionando um embasamento físico adequado na correção atmosférica (VERMOTE et al., 1997).

Esse método foi elaborado para modelar os seguintes parâmetros atmosféricos: modelos estatísticos baseados nas bandas de absorções atmosféricas, modelagem de várias funções atmosféricas para um tratamento completo do processo de espalhamento, e um tratamento aproximado de interação entre os dois efeitos atmosféricos (LATORRE et al., 2002). Os

parâmetros de entrada para a correção atmosférica são: as configurações das condições geométricas do satélite, dia, mês, latitude e longitude, modelo atmosférico, visibilidade horizontal, altura em relação ao alvo, altitude de superfície e banda espectral.

Para verificar o resultado de uma correção atmosférica, deve-se observar as curvas de reflectância dos alvos conhecidos presentes na imagem, pois os objetos da superfície terrestre refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características biológicas, físicas e químicas. Devido a essas variações, é possível distinguir os objetos da superfície terrestre nas imagens de sensores remotos (ANTUNES et al., 2012; SOARES, 2017).

Tem-se também, os denominados métodos híbridos para a correção atmosférica que são construídos a partir da combinação de versões simplificadas dos códigos de transferência radiativa com informações de estatística da cena (GAO et al., 2009). A aplicação destes modelos necessita de uma menor quantidade de informações sobre os parâmetros atmosféricos do momento da aquisição da imagem. No entanto, alguns destes métodos utilizam medidas de reflectância de alvos *in situ* para a calibração da reflectância de superfície obtida com os códigos de transferência radiativa, eliminando eventuais erros residuais. Podem ser localmente úteis quando houver problemas de calibração de dados, como em algumas aplicações de imagem hiperespectrais reportadas na literatura (BEN-DOR et al., 2004). Um exemplo deste tipo de método é o algoritmo *Image CORrection for atmospheric effects (iCOR)* (VITO, 2017; GAIDA et al., 2020).

Os principais efeitos observados nas imagens orbitais multiespectrais são a diminuição da faixa de valores digitais registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies e alteração do brilho de cada ponto da imagem (WEISS et al., 2014). Esta correção é necessária visando a obtenção de informações consistentes de provenientes de imagens que serão utilizadas para a estimativa de parâmetros da superfície a partir das características espectrais dos alvos e para validação de coeficientes de calibração (ANTUNES et al., 2012).

2.6 Programa CBERS

O programa *China Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS) é uma parceria entre China e Brasil com a proposta de lançar uma série de satélites. Este programa tem uma função estratégica para o país uma vez que o programa Landsat pode se tornar parcialmente ou inteiramente comercial no futuro (ANTUNES E TAVARES JÚNIOR, 2005).

Os governos do Brasil e da China assinaram em 06 de julho de 1988 um acordo de parceria envolvendo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (do inglês, *China Academy of Space Technology* - CAST) para o desenvolvimento de um programa de construção de dois satélites avançados de Sensoriamento Remoto, denominado Programa *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS) - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (EMBRAPA, 2023).

Ainda, segundo Embrapa (2023), o Programa CBERS contemplou o desenvolvimento e construção vários satélites de sensoriamento remoto, ao longo dos anos, e a evolução foi realizada com base na seguinte sequência:

- a) CBERS-1 e 2: composto por dois módulos, senso o primeiro o módulo de sensores, que acomoda os sistemas ópticos, incluindo a Câmera Imageadora de Alta Resolução (*High Resolution CCD Camera* - CCD), o Imageador por Varredura de Média Resolução (*Infrared Multispectral Scanner* - IRMSS), e a Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (*Wide Field Imager* - WFI). Já o segundo módulo é o de serviço, responsável

- por suprimento de energia, controles, telecomunicações e demais funções necessárias para a operação do satélite;
- b) CBERS-2B: Lançado em 2007 como uma extensão do CBERS-2, descontinuado em 2004. O CBERS-2B, semelhante aos CBERS-1 e 2, contudo substituiu o IRMSS pela Câmera Pancromática de Alta Resolução (HRC) e operou até 2010;
 - c) CBERS-3: Lançado em 9 de dezembro de 2013, porém, devido a uma falha no veículo lançador Longa Marcha 4B, não alcançou a órbita prevista, reentrando na atmosfera terrestre. Em resposta, o lançamento do CBERS-4 foi antecipado, ocorrendo com sucesso em 7 de dezembro de 2014, a partir da base de Taiyuan, na China;
 - d) CBERS-3 e 4: Representaram uma evolução em relação aos satélites anteriores, com quatro câmeras a bordo, sendo: a Câmera Pancromática e Multiespectral (PAN), a Câmera Multiespectral Regular (MUX), o Imageador Multiespectral e Termal (IRS) e a Câmera de Campo Largo (WFI), todas com melhorias nos desempenhos geométrico e radiométrico;
 - e) CBERS-4A: Lançado em 20 de dezembro de 2019, com sensores semelhantes aos do CBERS-3 e 4, mas apresentando melhorias significativas na câmera imageadora chinesa, especialmente em termos de resolução geométrica e espectral; e
 - f) CBERS-6: Em 14 de abril de 2023, Brasil e China assinaram um acordo para o desenvolvimento do sexto satélite da série. O CBERS-6 será equipado com um radar, em vez de câmeras ópticas, permitindo a obtenção de imagens mesmo em condições de cobertura por nuvens. Essa tecnologia será crucial para monitorar a Amazônia, rios e a costa brasileira, com capacidade de identificar manchas de óleo (BRASIL, 2023).

As características dos satélites CBERS podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros dos satélites CBERS.

Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres						
Instituições responsáveis	INPE e CAST					
Satélite	CBERS-1	CBERS-2	CBERS-2B	CBERS-3	CBERS-4	CBERS-4A
Lançamento	14/10/99	21/10/03	19/09/07	09/12/13	12/07/14	20/12/19
Situação	Inativo	Inativo	Inativo	Inativo	Ativo	Ativo
Altitude (km)	778	778	778	778	778	628,6
Inclinação (°)	98,504	98,504	98,504	98,504	98,504	97,89
Duração da órbita (minutos)	100,26	100,26	100,26	100,26	100,26	*s.d.
Horário da passagem	10:30h	10:30h	10:30h	10:30h	10:30h	10:30h
Resolução Temporal	26 dias	26 dias	26 dias	26 dias	26 dias	31 dias
Sensores integrados	CCD IRMSS WFI	CCD IRMSS WFI	CCD HRC WFI	PAN MUX IRS WFI	PAN MUX IRS WFI	MUX WFI WPM

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2023).

Legenda: sem dados (*s.d.).

O CBERS-4 possui quatro câmeras ópticas, duas brasileiras (MUX e WFI) e duas chinesas (PAN e IRS) que apresentam resolução espacial destinada a monitorar desmatamentos, queimadas, nível de reservatórios, desastres naturais, expansão agrícola, entre outras aplicações. O CBERS 4A, sexto satélite da parceria, garante a continuidade no fornecimento das imagens utilizadas por mais de 20 mil instituições no Brasil (INPE, 2023).

- Os instrumentos a bordo dos satélites CBERS são (EMBRAPA, 2023; INPE, 2023):
- a) Câmera Pancromática e Multiespectral (PAN): a câmera PAN possui uma faixa estreita de imageamento de 60 km, tendo como consequência um tempo de revisita de 26 dias, gerando um recobrimento incompleto no equador em relação aos outros imageadores. Para sanar esse inconveniente, esse imageador é dotado de um espelho de visada lateral, desenvolvido para cobrir faixas adjacentes ao percurso subsatélite, levando a resolução temporal regular do PAN para 52 dias. A adoção de um sistema de operação à semelhança daquele adotado para a câmera HRC do satélite CBERS-2B pode assegurar recobrimentos territoriais globais regulares a cada 52 dias. Esta câmera é a de melhor resolução espacial a bordo dos CBERS-4, com 5 metros na banda pancromática e 10 metros nas multiespectrais. As resoluções da câmera PAN a bordo dos satélites CBERS-3 e CBERS-4 podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3: Resoluções da câmera PAN.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
PAN	PAN	0,77-0,89 μm	52 dias	5m	8 bits	60 km
	G	0,51-0,85 μm				
	R	0,52-0,59 μm		10 m		
	NIR	0,63-0,69 μm				

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

- b) Câmera Multiespectral Regular (*Multispectral Camera* - MUX): produzida no Brasil, sua principal função é manter a continuidade dos imageamentos feitos pelos três CBERS antecessores, cujo sensor assegura um recobrimento global pelo CBERS com um campo de visada estreito e pouca alteração no tamanho do pixel nas bordas da imagem. As aplicações dessa câmera são as já desenvolvidas para os satélites que possuem câmeras nessa classe de resolução (20 metros). Ao contrário da sua congênere a bordo dos CBERS anteriores, a MUX não possui capacidade de visada lateral, essa capacidade foi transferida para a câmera PAN. As resoluções da câmera MUX a bordo dos satélites CBERS-3, CBERS-4 e CBERS-4A, podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4: Resoluções da câmera MUX.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
MUX (CBERS-3, CBERS-4)	B	0,45-0,52 μm	26 dias	20 m	8 bits	120 km
	G	0,52-0,59 μm				
	R	0,63-0,69 μm				
	NIR	0,77-0,89 μm				

Tabela 4: Cont.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
MUX (CBERS-4A)	B	0,45-0,52 μm	31 dias	16,5 m	8 bits	95 km
	G	0,52-0,59 μm				
	R	0,63-0,69 μm				
	NIR	0,77-0,89 μm				

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

- c) Imagemador Multiespectral e Termal (*Infrared Resolution Scanner* - IRS): é um sensor de varredura mecânica. Sua resolução espacial é de 40 metros nas bandas PAN e do infravermelho de ondas curtas (*Shortwave Infrared* - SWIR) e para 80 metros na banda termal. As resoluções da câmera IRS a bordo dos satélites CBERS-3 e CBERS-4 podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5: Resoluções da câmera IRS.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
IRS	PAN	0,50-0,90 μm	26 dias	40 m	8 bits	120 km
	SWIR	1,55-1,75 μm				
	SWIR	2,08-2,35 μm		80 m		
	TIR	10,40-12,50 μm				

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

- d) Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (*Wide Field Imager* - WFI): mantém o propósito de obter imagens em curto espaço de tempo, permitindo formas mais eficientes de vigilância do território. As resoluções da câmera WFI dos satélites CBERS-1, CBERS-2, CBERS-2B, CBERS-3 e CBERS-4A podem ser visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6: Resoluções da câmera WFI.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
WFI (CBERS-1, CBERS -2, CBERS -2B)	R	0,45-0,52 μm	5 dias	260m	*s.d.	890 km
	NIR	0,52-0,59 μm				
WFI (CBERS-3)	B	0,45-0,52 μm	5 dias	64 m	10 bits	866 km
	G	0,52-0,59 μm				
	R	0,63-0,69 μm				
	NIR	0,77-0,89 μm				
WFI (CBERS-4A)	B	0,45-0,52 μm	5 dias	55 m	10 bits	684 km
	G	0,52-0,59 μm				
	R	0,63-0,69 μm				
	NIR	0,77-0,89 μm				

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

Legenda: sem dados (*s.d.).

- e) Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (*Wide Scan Panchromatic and Multispectral Camera* - WPM): foi projetada pela China e lançada a bordo do

CBERS-4A em dezembro de 2019. As resoluções da câmera WPM a bordo do satélite CBERS-4A podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7: Resoluções da câmera WPM.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
WPM	PAN	0,45-0,90 μm	31 dias	2 m	10 bits	866 km
	B	0,45-0,52 μm				
	G	0,52-0,59 μm				
	R	0,63-0,69 μm				
	NIR	0,77-0,89 μm		8 m		

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

- f) Câmera Imageadora de Alta Resolução (*High Resolution CCD Camera - CCD*): esta câmera tem capacidade de orientar seu campo de visada dentro de aproximadamente 32°, possibilitando a obtenção de imagens estereoscópicas de certa região. Além disso, qualquer fenômeno detectado pela WFI pode ser focalizado pela câmera CCD, para estudos mais detalhados, através de seu campo de visada no máximo a cada três dias. As duas faixas espectrais do WFI são também empregadas na câmera CCD para permitir a combinação dos dados obtidos pelas duas câmeras. As resoluções da câmera CCD a bordo do satélite CBERS-4A podem ser visualizadas na Tabela 8.

Tabela 8: Resoluções da câmera CCD.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
CCD	PAN	0,51 - 0,73 μm	26 dias (visada vertical)	20 m	*s.d.	113 km
	B	0,45 - 0,52 μm				
	G	0,52 - 0,59 μm				
	R	0,63 - 0,69 μm	3 dias			
	NIR	0,77 - 0,89 μm	(visada lateral)			

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

Legenda: sem dados (*s.d.).

- g) Imageador por Varredura de Média Resolução (*Infrared Multispectral Scanner - IRMSS*): a câmera de varredura IRMSS tem quatro faixas espectrais e estende o espectro de observação do CBERS até o infravermelho termal. Em 26 dias obtém-se uma cobertura completa da Terra, que pode ser correlacionada com aquela obtida através da câmera CCD. Está presente nos CBERS-1 e 2, mas não no CBERS-2B; neste, foi substituído pela câmera pancromática de alta resolução (*High Resolution Camera - HRC*). As resoluções da câmera IRMSS a bordo do satélite CBERS-4A podem ser visualizadas na Tabela 9.

Tabela 9: Resoluções da câmera IRMSS.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada	
IRMSS	PAN	0,50-1,10 μm	26 dias	80 m	*s.d.	120 km	
	SWIR	1,55-1,75 μm					
	SWIR	2,08-2,35 μm		160 m			
	TIR	10,40-12,50 μm					

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

Legenda: sem dados (*s.d.).

- h) Câmera Pancromática de Alta Resolução (*High Resolution Camera* - HRC): a câmera HRC opera numa única faixa espectral, que cobre o visível e parte do infravermelho próximo. Está presente apenas no CBERS-2B, mas não nos CBERS-1 e 2. Produz imagens de uma faixa de 27 km de largura com uma resolução de 2,7 m, que permitirá a observação com grande detalhamento dos objetos da superfície. Porém, são necessários cinco ciclos de 26 dias para que os 113 km padrão da CCD sejam cobertos pela HRC. Assim, a cada 130 dias será possível ter uma cobertura completa do país, para ser correlacionada com aquela obtida pela câmera CCD, que neste período terá coberto o país por cinco vezes. As resoluções da câmera HRC a bordo do satélite CBERS-4A podem ser visualizadas na Tabela 10.

Tabela 10: Resoluções da câmera HRC.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa Imageada
HRC	PAN	0,50-0,80 μm	130 dias	2,7 m	8 bits	27 km (Nadir)

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

Informações técnicas adicionais do CBERS 4A podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros do CBERS-4A.

INFORMAÇÕES TÉCNICAS	
Operadores	<i>Brasil (INPE) e China (CAST)</i>
Data de Lançamento	20 de dezembro de 2019
Altura da órbita	778 km
Tipo de órbita	sol-síncrona
Período de órbita	100,26 minutos
Inclinação	98,504°
Sensores integrados	<i>PAN, MUX, WFI e IRS</i>
Dados	8 bits (MUX), 10 bits (WFI e WPM)

Fonte: Adaptado de INPE (2023); EMBRAPA (2023).

2.7 Série Landsat

De acordo com USGS (2023), as atuais taxas crescentes de cobertura e utilização do solo a nível mundial têm consequências profundas para as alterações climáticas e meteorológicas, para o funcionamento e serviços dos ecossistemas, para a ciclagem e sequestro de carbono, para a gestão de recursos, para a economia nacional e global, para a saúde humana e para a sociedade.

A missão do Landsat é estabelecer e executar uma estratégia de aquisição de dados que garanta a aquisição repetitiva de observações globais sobre a massa terrestre, limites costeiros e recifes de coral da Terra, apoiando trabalhos em agricultura, geologia, silvicultura, educação, mapeamento, resposta a emergências e socorro a desastres. Bem como, fornecer, um registro de longo prazo das mudanças naturais e induzidas pelo homem na Terra (NASA 2023; USGS 2023).

O Landsat é o único programa de satélite dos EUA projetado e operado para observar repetidamente a superfície terrestre global em uma média escala. Desde 1972 (Figura 7), os dados Landsat fornecem um recurso único para aqueles que trabalham em agricultura, geologia, silvicultura, planejamento regional, educação, mapeamento e investigação sobre alterações globais (USGS, 2023).

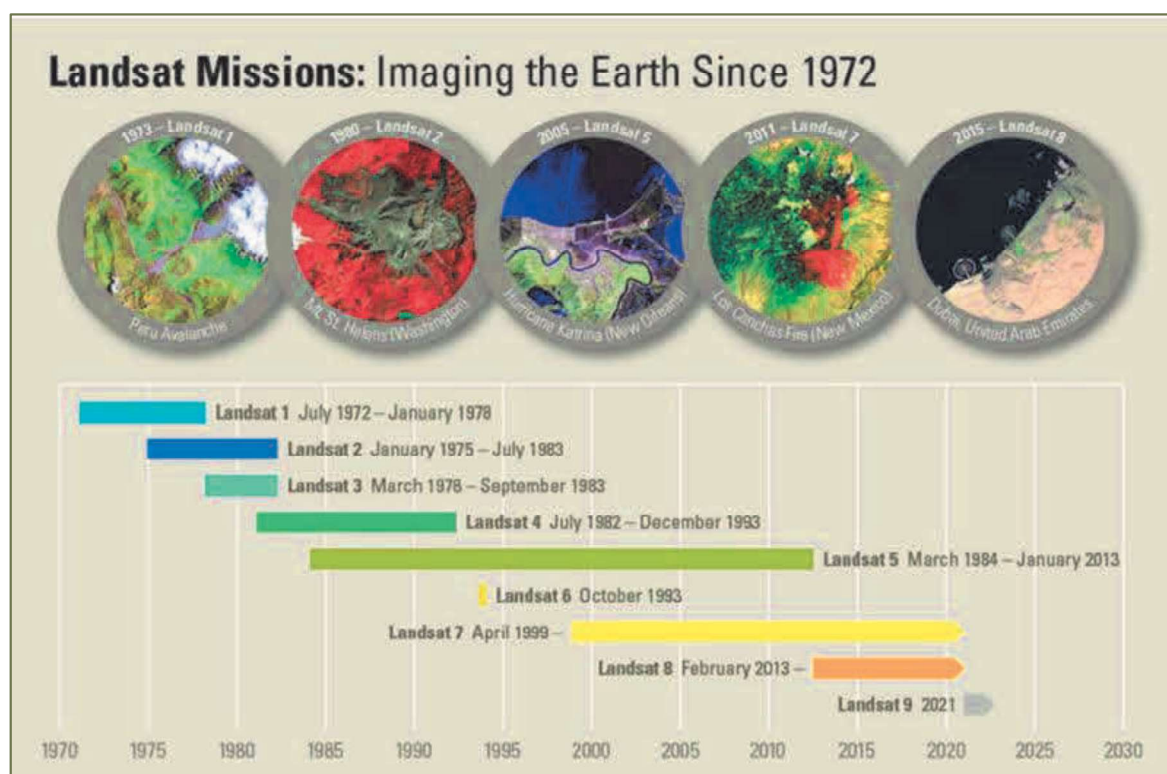


Figura 7: Série Histórica do Landsat.

Fonte: NASA (2023a); USGS (2023).

De acordo com USGS (2023) as missões do Landsat podem ser sintetizadas, como USGS (2023):

- Landsat 1 (1972): lançado em 23 de julho de 1972; originalmente chamado *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), foi posteriormente renomeado para Landsat 1; e iniciou o Projeto EROS, que fomentou colaborações internacionais em ciência e tecnologia;
- Landsat 2 (1975): lançado em 1975; seguiu o modelo de seu antecessor, continuando o monitoramento da superfície terrestre;
- Landsat 3 (1978) e Landsat 4 (1982): lançados em 1978 e 1982, respectivamente, representaram uma continuidade da missão, com aprimoramentos nos sensores e coleta de dados;

- d) Landsat 5 (1984): lançado em 1984; operou por 28 anos e 10 meses, fornecendo dados globais de alta qualidade; detém o recorde mundial do Guinness como o "satélite de observação da Terra com a operação mais longa";
- e) Landsat 6 (1993): lançado em 1993, porém não atingiu a órbita. Não é contabilizado entre as missões bem-sucedidas do programa devido à falha no lançamento;
- f) Landsat 7 (1999): lançado em abril de 1999; incorporou sensores que ampliaram o volume de dados de observação da Terra, com avanços em resolução espacial e radiométrica;
- g) Landsat 8 (2013): lançado em fevereiro de 2013; trouxe melhorias nos sensores e maior capacidade de aquisição de dados espectrais;
- h) Landsat 9 (2021): lançado em setembro de 2021; continuidade das missões Landsat, com sensores modernos e alta precisão na coleta de dados; lançado a partir da Base da Força Espacial de Vandenberg (antiga Base Aérea de Vandenberg); e
- i) Landsat Next - Previsto para (2030/2031): planejado para lançamento entre o final de 2030 e o início de 2031; consistirá em uma constelação de três satélites lançados simultaneamente, proporcionará revisita temporal aprimorada e operará em um novo Sistema de Referência Mundial; coletará dados em 26 bandas espectrais e terá capacidade de aquisição cerca de 20 vezes maior que o Landsat 9.

O Landsat 8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, da Base Aérea de Vandenberg, Califórnia, em um foguete Atlas-V 401, com carenagem de sensores estendida (*Extended Payload Fairing* - EPF) da United Launch Alliance, LLC. Os sensores do satélite Landsat 8 consistem em dois instrumentos científicos - o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Estes dois sensores fornecem cobertura sazonal da massa terrestre global com uma resolução espacial de 30 metros (visível, infravermelho próximo, infravermelho médio); 100 metros (térmico); e 15 metros (pancromático) (ESA, 2023).

O Landsat 8 consiste em três missões principais e objetivos científicos (ESA, 2023):

- a) coletar e arquivar dados de imagens multiespectrais de média resolução, proporcionando cobertura sazonal da massa terrestre global;
- b) garantir que os dados do Landsat 8 sejam suficientemente consistentes com os dados das missões Landsat anteriores em termos de geometria de aquisição, calibração, cobertura, características espectrais, qualidade do produto de saída e disponibilidade de dados; e
- c) garantir que os produtos estejam disponíveis para *download* dentro de três horas.

De acordo com a NASA (2023), os instrumentos a bordo do Landsat 8 representam um avanço significativo na tecnologia de sensoriamento remoto. O sensor *Operational Land Imager* (OLI), projetado com uma vida útil estimada de cinco anos, apresenta características aprimoradas em comparação aos sensores das gerações anteriores da série Landsat. Este sensor utiliza a tecnologia de varredura do tipo *push-broom*, equipada com um telescópio de quatro espelhos e quantização de 12 bits, proporcionando maior precisão na coleta de dados. Além disso, o OLI introduziu duas novas bandas espectrais: uma otimizada para a detecção de nuvens de cirros e outra voltada para a análise da zona costeira, ampliando significativamente as aplicações no monitoramento ambiental.

As informações técnicas do Landsat 8, bem como as resoluções do sensor OLI e TIRS, podem ser visualizados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente.

Tabela 12: Informações técnicas do Landsat 8.

	INFORMAÇÕES TÉCNICAS
Operadores	<i>National Aeronautics and Space Administration (NASA)</i> e o <i>US Geological Survey (USGS)</i>
Data de Lançamento	11 de fevereiro de 2013
Altura da órbita	705 km
Tipo de órbita	Quase polar sincronizada com o Sol
Período de órbita	99 minutos
Inclinação	98,2°
Revisita (repetir ciclo)	16 dias
Tempo de travessia equatorial	10h +/- 15 min
Sensores integrados	<i>Operational Land Imager (OLI)</i> e <i>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</i>
Dados	12 bits

Fonte: NASA (2023); USGS (2023); ESA (2023).

Tabela 13: Resoluções do sensor OLI e TIRS embarcado no satélite Landsat 8.

Características	Landsat 8 (OLI e TIRS)
Bandas Espectrais	0,435 - 0,451 μm (Aerossóis)
	0,452 - 0,512 μm (Azul)
	0,533 - 0,590 μm (Verde)
	0,636 - 0,673 μm (Vermelho)
	0,851 - 0,879 μm (Infravermelho Próximo)
	1,566 - 1,651 μm (Infravermelho Médio 1)
	2,107 - 2,294 μm (Infravermelho Médio 2)
	0,503 - 0,676 μm (Pan)
	1,363 - 1,384 μm (Cirrus)
	10,60 – 11,19 μm – (Infravermelho Termal -TIRS 1)
Resolução Espacial	11,50 – 12,51 μm – (Infravermelho Termal TIRS 2)
	30 metros
	100 metros (TIRS 1 e 2)
Resolução Temporal	15 metros (Pancromática)
	16 dias
Resolução Radiométrica	12 bits

Fonte: INPE (2023).

O Landsat 8 tem adquirido regularmente 725 cenas por dia (enquanto o Landsat 7 adquire 438 cenas por dia). Isto aumenta a probabilidade de capturar cenas sem nuvens para a massa terrestre global. O tamanho da cena do Landsat 8 é de 185 km x por 180 km. A altitude nominal da espaçonave é de 705 km. A precisão cartográfica de 12 m ou melhor (incluindo compensação para efeitos de terreno) é requerida dos produtos de dados Landsat 8 (NASA, 2023).

2.8 Missão Sentinel 2

A missão europeia Sentinel 2, que fornece imagens multiespectrais de alta resolução, consiste em dois satélites idênticos operando em uma mesma órbita, heliossíncrona, separados a 180°. Cada satélite leva a bordo o Instrumento Multiespectral Óptico (*Multi-Spectral Instrument – MSI*), que registra dados em 13 bandas espectrais, distribuídas da seguinte forma: quatro bandas com resolução espacial de 10 m, seis bandas com 20 m e três bandas com 60 m.

A largura da faixa de imageamento cobre 290 km em comparação com a do Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM+ que é de 185 km, e a largura de faixa do SPOT-5 que é de 120 km.

De acordo com ESA (2025), a missão Sentinel 2 consiste em dois satélites idênticos operando juntos, Sentinel 2B (lançado em 2017) e Sentinel 2C (lançado em 2024) que foram lançados usando o lançador europeu VEGA. Já o Sentinel 2A (lançado em 2015) ficou operacional até 21 de janeiro de 2025, após uma década de operação, quando foi substituído pelo Sentinel 2C, cujo lançamento foi realizado visando a continuação da missão Copernicus Sentinel 2.

O Sentinel 2C foi lançado em 5 de setembro de 2024 e se juntou aos outros dois satélites, começando a operar junto com o Sentinel 2A para garantir calibração perfeita e coleta de dados ininterrupta. O Sentinel 2D sucederá ao Sentinel 2B. A missão continuará evoluindo com o *Sentinel-2 Next Generation*, prometendo medições globais aprimoradas e continuidade além de 2035, garantindo serviços essenciais de observação da Terra (COPERNICUS PROGRAMME (2025); ESA (2025)). A configuração orbital dos satélites gêmeos do Sentinel 2 pode ser observada na Figura 8.

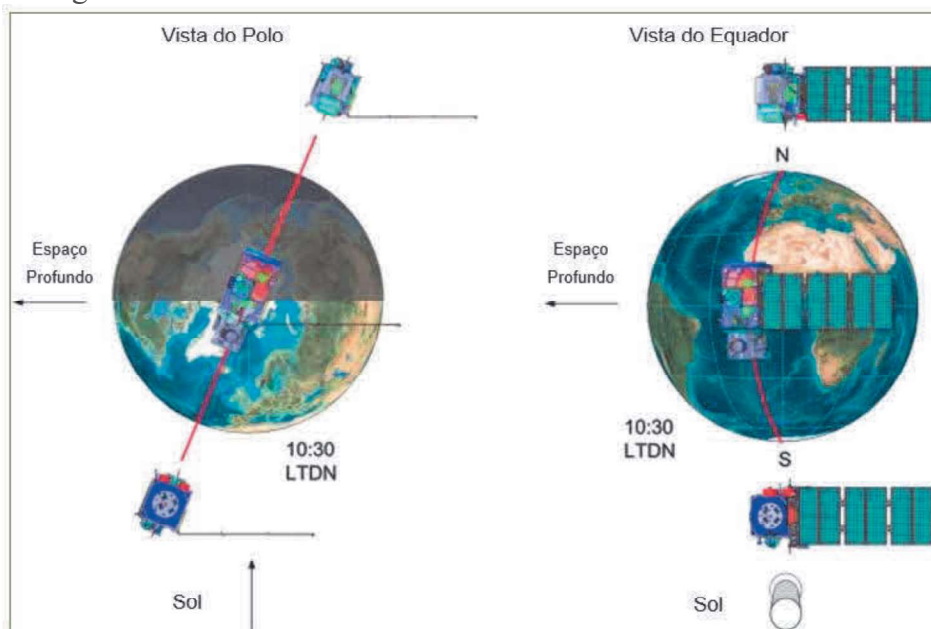


Figura 8: Configuração orbital do Sentinel 2.

Fonte: Adaptado de Astrium GmbH (2025).

O sensor MSI (Figura 9) a bordo dos satélites Sentinel 2, funciona passivamente, coletando a luz solar refletida da Terra. O MSI opera com o conceito *push-broom*, no qual a captura de imagens ocorre por meio da coleta contínua de dados ao longo da faixa de imageamento. O deslocamento da espaçonave em sua órbita permite a aquisição sequencial dos dados, resultando em uma varredura completa da superfície terrestre. O tempo médio de observação sobre áreas terrestres e costeiras é de aproximadamente 17 minutos, podendo atingir um período máximo de 32 minutos (COPERNICUS PROGRAMME (2025); ESA (2025)). Maiores informações sobre a missão Sentinel 2, acessar: <<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission#S2-Mission-MSI-Instrument>>.



Figura 9: Sensor MSI dos satélites Sentinel 2.

Fonte: ESA (2025).

Os satélites Sentinel 2 contribuem na continuidade do legado das missões SPOT e LANDSAT, fornecendo semelhantes dados de imagem, além de observações multiespectrais contínuas. Eles desempenham um papel essencial no suporte a diversos serviços e aplicações do programa Copernicus, incluindo gestão territorial, agricultura, silvicultura, monitoramento de desastres, operações de ajuda humanitária, mapeamento de riscos e questões de segurança (ESA, 2025). As informações técnicas dos satélites da missão Sentinel, bem como as resoluções do sensor MSI, podem ser visualizados nas Tabelas 14 e 15, respectivamente.

Tabela 14: Informações técnicas dos satélites da missão Sentinel.

Instituições responsável	MISSÃO SENTINEL							
	- Consórcio industrial <i>Astrium GmbH</i> (Alemanha) – Satélites; - <i>Astrium SAS</i> (França) – o sensor MSI.							
Satélite	Sentinel 1A	Sentinel 1B	Sentinel 2A	Sentinel 2B	Sentinel 2C	Sentinel 3A	Sentinel 3B	Sentinel 5P
Lançamento	03/04/14	25/04/16	23/06/15	07/03/17	05/09/24	16/02/16	25/04/18	13/10/17
Situação	Inativo	Inativo	Inativo	Ativo	Ativo	Ativo	Ativo	Ativo
Altitude (km)	693	693	786	786	786	814,5	814,5	824
Inclinação (°)	98,18	98,18	98,62	98,62	98,62	98,65	98,65	98,7
Duração da órbita (minutos)	98,6	98,6	100,6	100,6	100,6	100,99	100,99	*s.d.
Horário da passagem (hora)	18:00h	18:00h	10:30h	10:30h	10:30h	10:00h	10:00h	13:30h
Resolução Temporal	12 dias	12 dias	5 dias	5 dias	5 dias	27 dias	27 dias	16 dias
Sensores integrados	SAR	SAR	SAR MSI	SAR MSI	MSI	OLCI SLSTR	OLCI SLSTR	TROPOMI

Fonte: ESA (2025).

Legenda: sem dados (*s.d.).

Tabela 15: Resoluções do sensor MSI embarcado nos satélites Sentinel 2.

Características	Sentinel 2 (MSI)	Resolução Espacial
Bandas Espectrais	0,493 μm (Azul)	10 m
	0,560 μm (Verde)	
	0,665 μm (Vermelho)	
	0,833 μm (Infravermelho Próximo)	
	704 μm (VNIR 1)	20 m
	740 μm (VNIR 2)	
	783 μm (VNIR 3)	
	865 μm (VNIR 4)	
	1,610 μm (SWIR 1)	
	2190 μm (SWIR 2)	
	0,443 μm (Aerossóis)	60 m
	0,945 μm (Vapor de Água)	
	1,374 μm (Cirrus)	
Resolução Temporal	5 dias (2 satélites no Equador)	
Resolução Radiométrica	12 bits	

Fonte: ESA (2025).

2.9 Espectrorradiômetro

Os espectrorradiômetros, Figura 10, assim como os radiômetros e sensores imageadores orbitais utilizados em SR, registram dados da REM refletida ou emitida por alvos na superfície terrestre. A principal diferença entre esses instrumentos reside na forma como os dados são armazenados e disponibilizados aos usuários, bem como na posição relativa dos equipamentos em relação aos alvos observados.



Figura 10: Espectrorradiômetro.

Fonte: O Autor (2023).

Os sensores imageadores presentes nos satélites orbitais medem a radiância refletida por comprimento de onda dos alvos e estabelecem a imagem dos objetos em níveis de cinza, em que os valores de cinza claros correspondem a alvos com alta reflectância e os valores de cinza escuros correspondem a alvos com baixa reflectância. Por sua vez, os espectrorradiômetros realizam procedimento semelhante, porém não geram uma imagem de saída, mas sim gráficos que relacionam a porcentagem da reflectância com o comprimento de onda correspondente (MENESES E ALMEIDA, 2012).

As medições espectrorradiométricas podem ser feitas em campo ou em laboratório, tendo como principal objetivo o conhecimento do comportamento da reflectância dos materiais

para se determinar propriedades de suas naturezas física, química e biótica, ou, em resumo, suas composições, e estas são transmitidas aos usuários não em forma de imagens, mas sim, em uma *curva de reflectância espectral* (MENESES E ALMEIDA, 2012; MENESES, ALMEIDA E BAPTISTA, 2019; MENESES, ALMEIDA E BAPTISTA, 2019a).

Os dados obtidos com estes instrumentos podem ser coletados tanto em laboratório, quanto em campo, entretanto, a forma como serão adquiridos requer cuidados específicos devido a sensibilidade do equipamento.

Quando as medidas são realizadas em laboratório, tem-se condições controladas e sem interferências da atmosférica, logo as informações possuem maior confiabilidade ao relacionar a reflectância diretamente com a composição do material, permitindo, assim, avaliar com maior precisão suas características. Por outro lado, as medidas em campo estão vulneráveis aos efeitos atmosféricos durante todo levantamento, além da questão da luminosidade do local, ângulo de incidência da REM, entre outros fatores, exigindo, maiores cuidados, contudo, tem a vantagem de que podem ser utilizadas, na maioria dos casos, para fins comparativos com imagens de sensores orbitais.

As medidas com espectrorradiômetro em laboratório requerem um arranjo instrumental entre a fonte de radiação eletromagnética (uma lâmpada halogênica ou Sol), a amostra, uma placa de referência e o sensor. O ideal seria que as medidas da placa e do alvo fossem feitas simultaneamente, porque qualquer fonte de luz produz radiação eletromagnética com pequenas variações de intensidade radiante no tempo, afetando as medidas, mas isto não é possível (MORAES NOVO, 2002; MENESES, ALMEIDA E BAPTISTA, 2019a).

Segundo Moraes Novo (2002) para contornar o problema supracitado, na prática, o que se faz é uma medida equivalente da reflectância, denominada Fator de Reflectância (FR), obtida por meio da razão entre a radiância L_a do alvo e a radiância L_p de uma superfície Lambertiana ideal (representada por uma placa *Spectralon* de referência) iluminada pela fonte, permitindo estabelecer a equivalência entre o fator de reflectância e a reflectância real (ρ_a) de um alvo.

Adicionalmente aos problemas relacionados à atmosfera e luminosidade, também deve-se considerar os ângulos zenitais entre a fonte de radiação e o sensor, os quais influenciam significativamente as medições, conforme ilustrado na Figura 11.

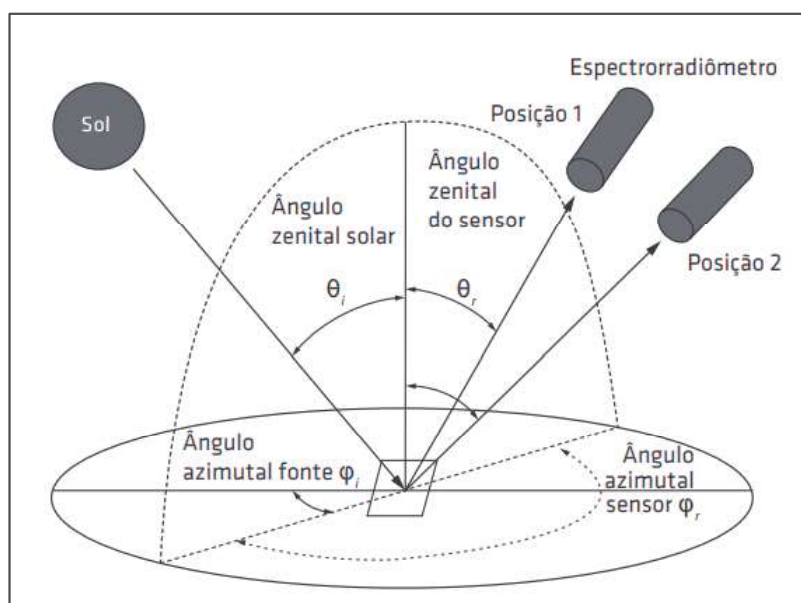


Figura 11: Relações angulares do fator de reflectância.

Fonte: Meneses; Almeida e Baptista (2019).

De acordo com a Figura 8, nesse caso, o fator de reflectância deve ser redimensionado como Fator de Reflectância Bidirecional (FRB), pois os valores das intensidades da reflectância medida dependem dos ângulos (θ , φ) entre a posição do espectrorradiômetro e a posição da fonte em relação ao alvo. O termo bidirecional implica a necessidade de medidas direcionais com ângulos sólidos muito pequenos. O FRB pode ser calculado pela Equação 21 (MILTON, 1987).

$$FRB = \left(\frac{L_a}{L_p} \right) \cdot K \quad (21)$$

Em que: L_a é a radiância do alvo; L_p é a radiância da placa de referência; e K é o coeficiente de calibração da referência (placa).

O uso das leituras espectrais fornece a qualquer pesquisa científica, informações de maior qualidade em curto espaço de tempo, confiabilidade, comparabilidades dos resultados e pode contribuir para a construção de bibliotecas espectrais que servem como padrões de referência de respostas espectrais (NOCITA et al., 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Delimitação da Área de Estudo

A pesquisa foi conduzida em duas áreas distintas. A primeira foi definida com o objetivo de ser uma região de simulação de uma superfície ideal para determinação dos parâmetros de calibração. Estas áreas ideais para a calibração de sensores são denominadas pseudo invariantes, que possuem características espectrais estáveis ao longo do tempo, com alta reflectância e o mínimo efeito atmosférico. Conforme Helder et al. (2010), o termo pseudo invariante refere-se a área da superfície terrestre que é estável ao longo do tempo e que adicionalmente tem cobertura de nuvens mínima e se localiza preferencialmente em altas altitudes, a fim de minimizar os efeitos atmosféricos. Áreas que possuem essas características podem ser visualizadas no site <https://calval.cr.usgs.gov/apps/test_sites_catalog>. Foi selecionada a região de Salar de Uyuni, nos Andes, sudoeste da Bolívia, a uma altitude média de 3700 m, e que ocupa uma superfície média de aproximadamente 200 km x 100 km totalmente cobertos por sal. É considerado o maior deserto de sal do mundo e a localização da área pode ser visualizada no mapa representado pela Figura 12. O Salar de Uyuni foi utilizado com sucesso em calibrações de sensores realizadas anteriormente (LAMPARELLI et al., 2003; PONZONI et al., 2004, ESCORIHUELA et al., 2012, YOO et al., 2017).

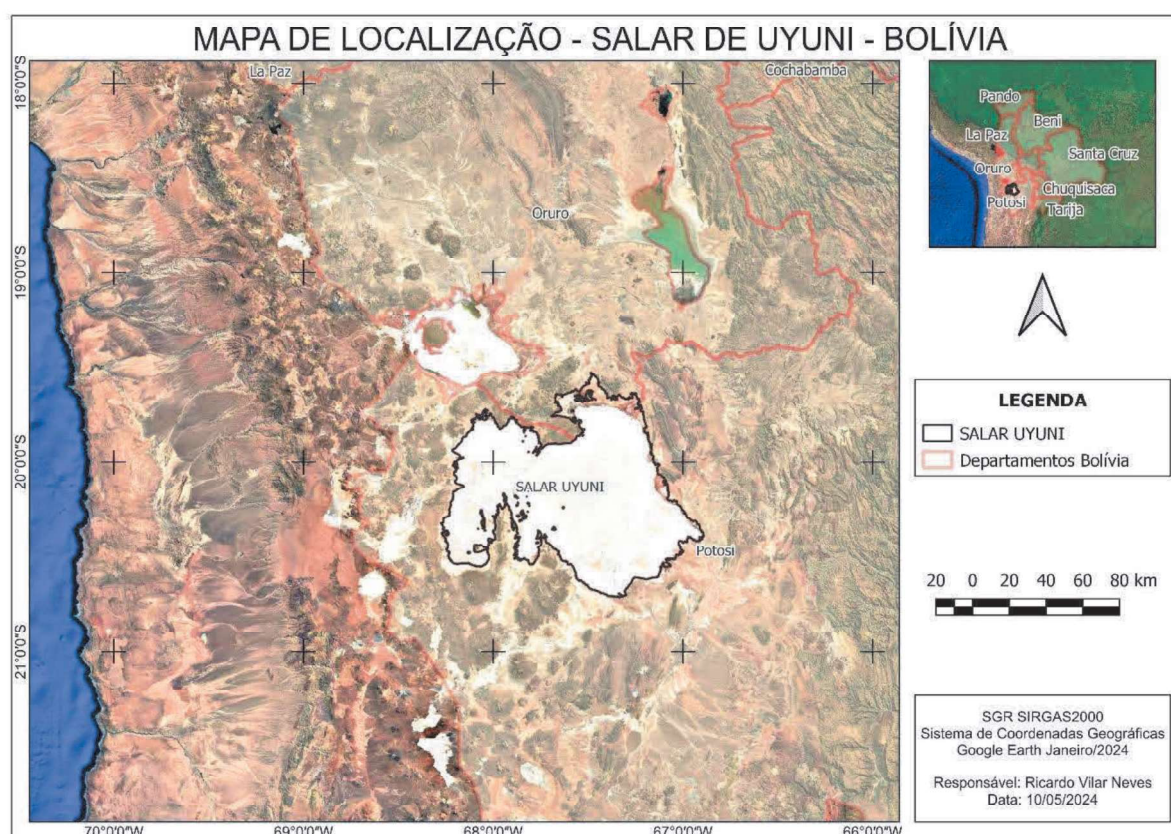


Figura 12: Mapa de localização da primeira área de estudo (Salar de Uyuni).

Fonte: O Autor (2024).

A segunda área de estudo está localizada na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica – RJ, em local utilizado para plantios agrícolas e estava com solo exposto na data da passagem do CBERS-4A. Esta área com solo exposto uniforme

serviu como base para a validação da calibração cruzada entre os sensores MUX do CBERS-4A e o OLI do Landsat 8 (referência), utilizando os dados das amostras provenientes do levantamento de campo com o espectrorradiômetro.

Esta área foi escolhida por apresentar superfície homogênea, no entanto, a questão do efeito atmosférico é bastante distinta em relação à do Salar de Uyuni, que se encontra a aproximadamente 3600 metros acima do nível do mar, resultando em um efeito atmosférico menor, quando comparado a Seropédica com aproximadamente 26 metros acima do nível do mar. O mapa de localização da segunda área pode ser visualizado na Figura 13.

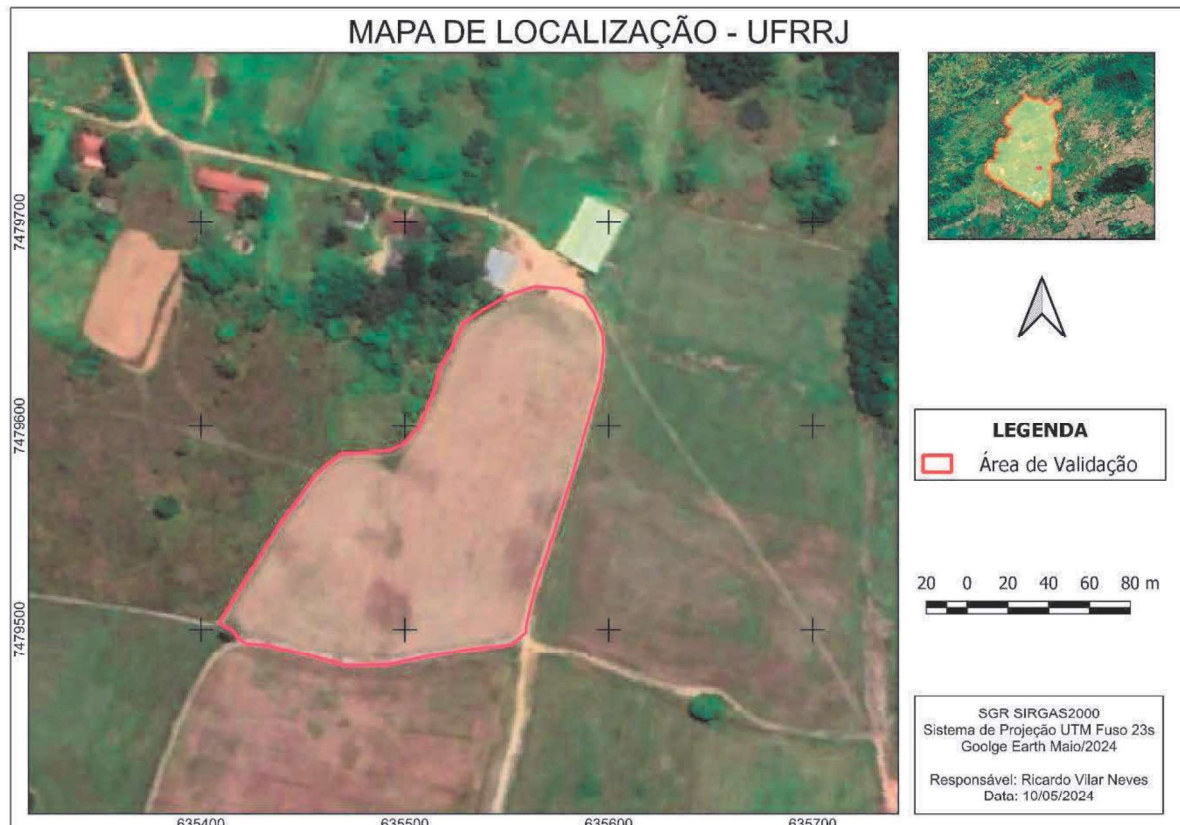


Figura 13: Mapa de localização da segunda área de estudo (área de validação UFRRJ).

Fonte: O Autor (2024).

3.2 Material

Para a realização da calibração cruzada dos sensores orbitais, bem como a sua validação com base em dados amostrais coletados em campo, foram utilizados os seguintes materiais:

- imagens multiespectrais do sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A;
- imagens multiespectrais do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8;
- imagens multiespectrais do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel 2;
- espectrorradiômetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution* da *ASD Inc. (PANalytical company)*;
- receptor GNSS RTK VR *Topcon®*;
- software QGIS, versão 3.16;
- software *ViewSpec®*, versão 6.0;
- software *R*, versão 4.4.2;
- software *LibreOffice®*; e

j) computador Intel Core i7, 16Gb memória.

3.3 Métodos

3.3.1 Aquisição dos dados e procedimentos para a realização da calibração cruzada

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia para calibração cruzada entre os sensores MUX, a bordo do satélite CBERS-4A (sensor a ser calibrado), e OLI, a bordo do satélite Landsat-8 (sensor de referência), a pesquisa foi organizada em duas etapas principais.

A primeira etapa foi relativa à determinação dos parâmetros de calibração e a segunda tratou da validação dos parâmetros determinados com dados de campo provenientes de um levantamento com o espectrorradiômetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution*.

3.3.2 Primeira etapa – determinação dos parâmetros de calibração

A metodologia proposta e aplicada no desenvolvimento da primeira etapa da pesquisa está explicitada no fluxograma da Figura 14.

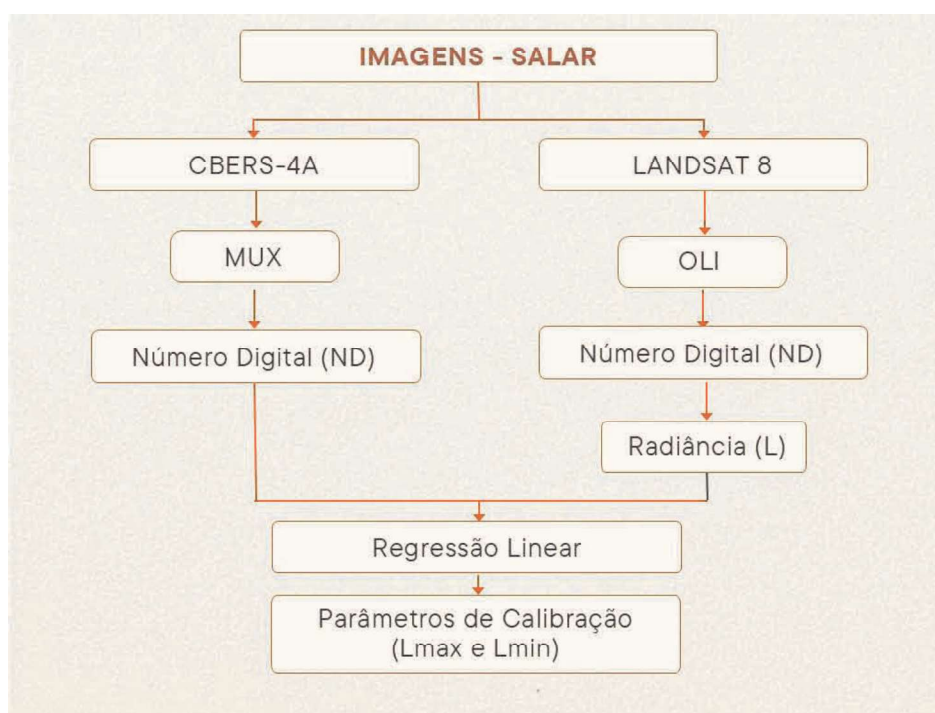


Figura 14: Fluxograma da metodologia proposta para a determinação dos parâmetros de calibração.

Fonte: O Autor (2024).

A proposta para a calibração cruzada de sensores orbitais é baseada em diversas etapas que precisam ser executadas de forma minuciosa e levando em consideração todos os critérios e exigências necessários para que seu resultado seja alcançado. Desta forma, destaca-se a primeira etapa da pesquisa, consistiu na definição da área de estudo e na aquisição dos dados, visto que a calibração foi realizada fora de um cenário controlado de um laboratório, e que efeitos adversos, principalmente os atmosféricos, ocorrerão durante os experimentos.

A escolha da primeira área de estudo foi baseada na recomendação de uma pesquisa pioneira de um especialista em calibração de sensores orbitais, que destacou o Salar de Uyuni,

o maior deserto de sal do mundo, como uma área de referência ideal para calibração espectral no hemisfério sul. Localizado na Bolívia, a área foi selecionada devido às suas características específicas, pois trata-se de uma superfície homogênea, pseudo-invariante (ou seja, com mínimas alterações ao longo do tempo), altamente refletiva e com baixo efeito atmosférico (PRICE, 1987).

Definida a área de estudo da primeira etapa da pesquisa, a aquisição de dados foi realizada a análise das datas de passagem dos satélites Landsat 8 (sensor de referência) e CBERS-4A (objeto de estudo) sobre a região, com o objetivo de determinar os parâmetros de calibração cruzada entre os sensores orbitais.

Para a realização da calibração cruzada, uma das exigências é que os satélites estejam passando sobre a área de estudo no mesmo dia e com mínima diferença de horário, pois o estudo tem que ser realizado com imagens obtidas de forma concomitante, isto é, simultaneamente. Este critério justifica-se pelo fato que desta forma, a área está exposta à mesma intensidade de energia radiante, além da questão da geometria aproximada, valores próximos de ângulos solar e de visada (THOME et al., 2003). Teillet et al. (2001) apontam em suas pesquisas que em imagens obtidas simultaneamente ou com diferença de até 30 minutos, as condições atmosféricas não se alteram significativamente, sendo um critério importante para a calibração.

Para a análise em questão, foi utilizado um calendário eletrônico desenvolvido a partir do conhecimento prévio sobre a resolução temporal dos satélites envolvidos (Landsat 8 com revisita a cada 16 dias e CBERS-4A a cada 31 dias). As informações das órbitas e horários de passagem dos satélites foram obtidas por meio do site N2yo.com, conforme ilustrado na Figura 15.

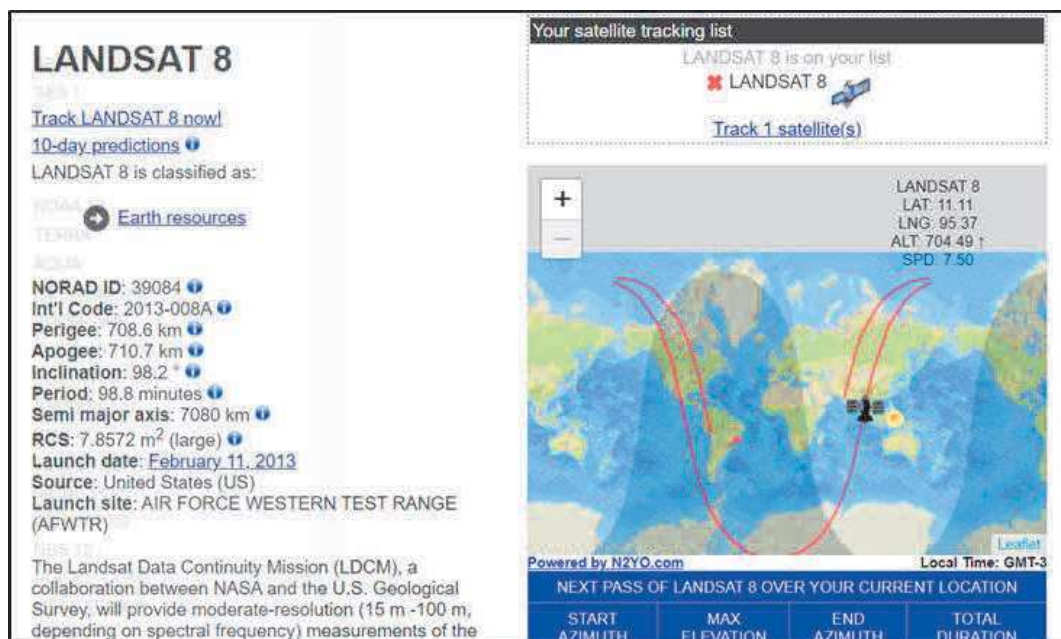


Figura 15: Página do site N2yo.com.

Fonte: N2YO (2023).

O site da N2yo.com fornece dados em tempo real da hora da órbita do Landsat 8, bem como a sua predição de passagem para os próximos 10 dias. Para o estudo do dia e hora da órbita do CBERS-4A, foram utilizadas informações do site do INPE. Este processo de análise dos dias e horas da passagem dos satélites sobre a área de estudo foi fundamental, tanto para a aquisição das imagens dos sensores, quanto para o planejamento de campo, visto que para a calibração cruzada seja possível, estas etapas devem ser realizadas ao mesmo tempo.

Posteriormente, ao cruzamento dos dados das órbitas dos satélites, foi definida a data do dia 05/01/2024 para aquisições das imagens do Landsat 8 e do CBERS-4A, por possuir menor quantidade de nuvens em relação a outras imagens com passagens concomitantes. As informações de data, hora, órbita/ponto e ângulo zenital solar, das imagens adquiridas podem ser visualizadas na Tabela 16.

Tabela 16: Data e hora de passagem dos satélites concomitantes no Salar do Uyuni.

Satélite/Sensor	Data	Hora (UTC)	Órbita/Ponto	Ângulo Zenital Solar
Landsat 8/OLI (REF)	05/01/2024	14:30h	233/074	29,1°
CBERS-4A/MUX	05/01/2024	15:03h	231/139	21,5°

Fonte: O Autor (2024).

As imagens do satélite CBERS-4A, para o sensor multiespectral MUX, foram adquiridas via *site* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O acesso as imagens do *site* do INPE, é realizado pela página do *gov.br* seguindo as opções: Acesso ao site do *gov.br* <<https://www.gov.br/inpe/pt-br>>; Acesso à Informação; Dados Abertos; Catálogo de Imagens do Satélite CBERS-04A. Na sequência abre a página do *site* de catálogo das imagens do INPE, de acordo com o exemplo da Figura 16, no qual o usuário deverá inicialmente fazer seu cadastro, e de forma sequencial, inserir as informações solicitadas nas três abas do lado esquerdo da tela para a aquisição das imagens de forma gratuita.

As informações solicitadas nas abas mencionadas no parágrafo precedente são referentes aos satélites e sensores, a área de abrangência da imagem que está sendo solicitada, data de intervalo de início da passagem do satélite pela área de estudo, cobertura de nuvem aceitável e o número de cenas máximas. Uma vez preenchida as informações requeridas, o *site* realiza a busca das imagens disponíveis de acordo com as informações repassadas pelo usuário e apresenta os resultados para que o mesmo selecione as cenas de interesse e inicie o processo *download*.

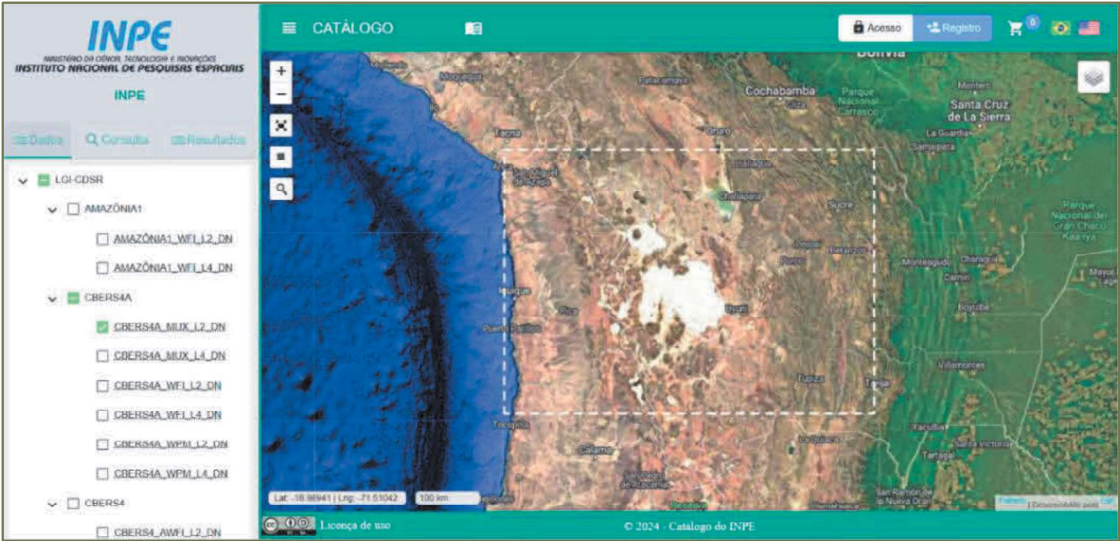


Figura 16: Catálogo de imagens do INPE.

Fonte: INPE (2023).

Da mesma forma que para o satélite CBERS-4A, foi realizado o processo de aquisição de imagens provenientes do sensor multiespectral OLI do Landsat 8, porém, neste caso, a aquisição das cenas foi realizada pelo *site* do *United States Geological Survey* (USGS) pelo link <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Para realizar a aquisição dos dados é necessário efetuar

o cadastro do usuário e de forma sequencial, inserir as informações solicitadas nas abas, ao lado esquerdo da tela para a aquisição das imagens de forma gratuita, conforme exemplo da Figura 17.

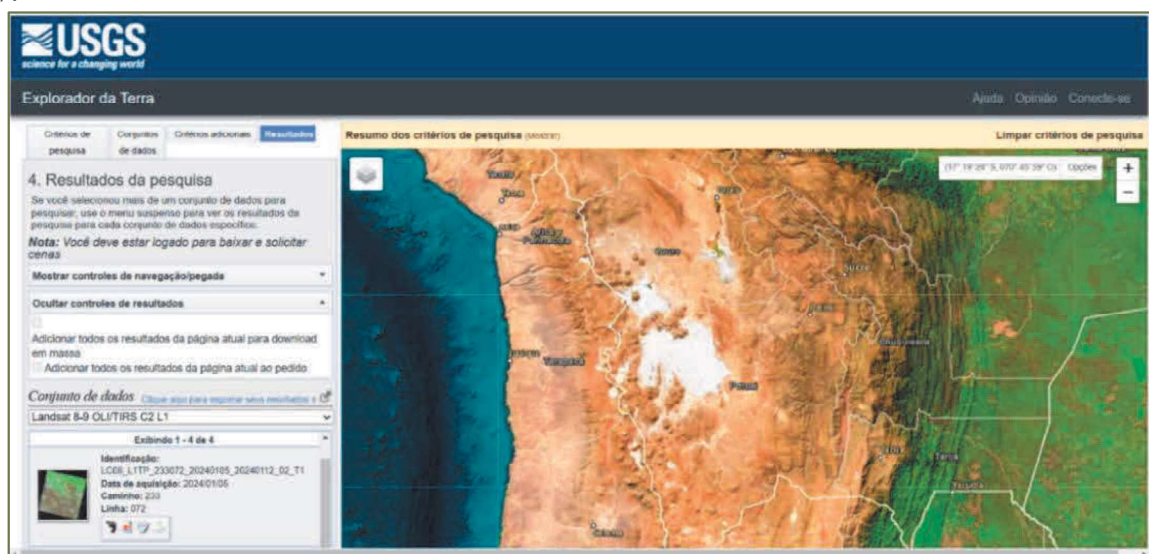


Figura 17: Explorador de imagens do USGS.

Fonte: USGS (2023).

De forma similar a obtenção das imagens do CBERS-4A, as informações solicitadas nas abas do *site* do USGS que são referentes aos satélites e sensores, a área de abrangência da imagem que está sendo solicitada, data de intervalo de início da passagem do satélite pela área de estudo, cobertura de nuvem aceitável são as mesmas. Entretanto, no *site* do USGS, algumas informações adicionais são disponibilizadas ao usuário, como por exemplo: feições em arquivo nos formatos *shapefile* e KML; a definição de áreas por países; dados de trilhas dos satélites; elevação do sol; entre outros.

Neste contexto, as imagens do Landsat 8, diferentemente do CBERS-4A, contêm informações referentes aos seus metadados, isto é, dados referentes à informação da sua calibração, que foram utilizados para determinar os parâmetros de calibração, objetivo da pesquisa nesta primeira etapa. Os metadados, provenientes do satélite Landsat 8, que foram utilizados como referência na calibração cruzada dos sensores do CBERS-4A, estão disponíveis no ANEXO A.

Adquiridas as imagens dos sensores do Landsat 8 e do CBERS-4A a sequência metodológica consistiu no processamento e na análise dos dados para a área de estudo. Neste processo foi utilizada a imagem MUX (CBERS-4A) Nível L2, ou seja, a imagem com correção radiométrica e correção geométrica de sistema fornecida em números digitais (NDs) a nível de satélite. Entretanto, essas imagens não são acompanhadas das informações físicas que são de interesse para a transformação destes valores de NDs em valores de radiância (L).

As imagens obtidas do Landsat 8, são as imagens Nível L1, isto é, imagens fornecidas em NDs a nível de satélite, com o arquivo de metadados com seus parâmetros de calibração disponibilizado junto com a imagem.

De posse das imagens do sensor de referência OLI do Landsat 8 e do sensor MUX do CBERS-4A a ser calibrado, foram definidos os critérios a serem seguidos, bem como o número de amostras a serem coletadas sobre as mesmas. Sendo assim, definiu-se um total de 24 amostras, obtidas de forma simultânea (nas duas imagens), nas quais cada amostra contemplou uma área de 60 m x 60 m. Contudo, devido as distintas resoluções espaciais dos dois sensores,

as amostras obtidas na imagem do Landsat 8 foram relativas a 4 pixels, enquanto, no CBERS-4A, para a mesma amostra, foram de 16 pixels.

O critério definido para a coleta das amostras, no que tange à escolha do número de amostras e o cálculo da média dos NDs dos pixels adjacentes por meio da média simples, foi visando a minimização das possíveis diferenças relativas à variabilidade espacial, isto é, distribui-se igualmente as pequenas variações na resposta radiométrica entre os pixels.

Tendo em vista a automatização no processo de coleta dos valores de NDs para as amostras, foi realizado um fluxo de trabalho no modelador do software QGIS® 3.16. A entrada dos dados é um arquivo do tipo *shapefile* com as amostras, com a área de 60 m x 60 m, feição tipo polígono, sobrepondo os pixels das imagens do Landsat 8 e do CBERS-4A. O modelador tem a função de obter os valores dos pixels sobrepostos pela amostra, além de calcular a média destes valores e armazenar em uma tabela. Este processo se repete para as bandas Azul, verde, vermelho e infravermelho próximo das imagens do Landsat 8 e do CBERS-4A, conforme ilustração da Figura 18.

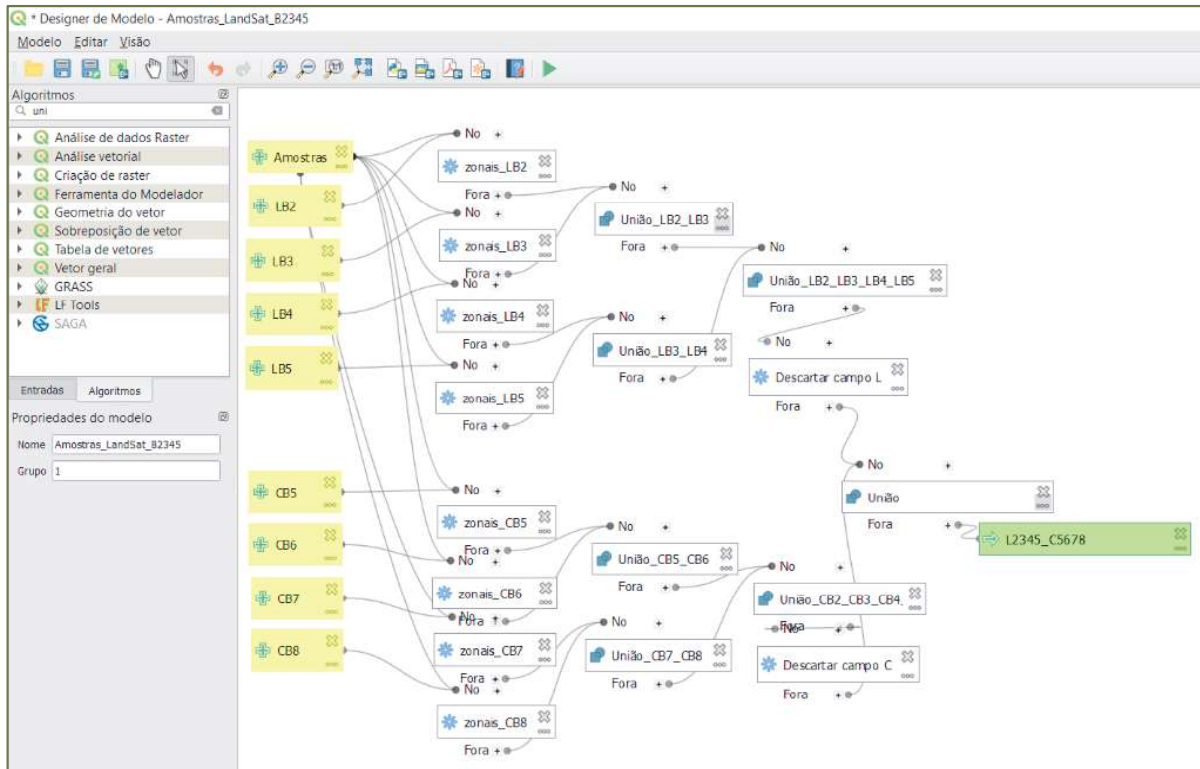


Figura 18: Automatização de coleta de amostras de ND no QGIS.

Fonte: O Autor (2024).

Coletadas as amostras nas imagens, em regiões sobrepostas, pré-determinadas, a etapa seguinte foi realizar a transformação dos NDs em radiância (L), para cada uma das bandas da imagem (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), dada pela inversão da equação da reta de calibração das imagens do satélite Landsat 8, aplicando a Equação 19, apresentada no Capítulo 2, reescrita aqui, como Equação 22, por questões de praticidade de leitura:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\lambda \max} - L_{\lambda \min}}{ND_{\lambda \max} - ND_{\lambda \min}} * (ND - ND_{\min}) + L_{\lambda \min} \quad (22)$$

Onde $L_{\lambda_{\max}}$ e $L_{\lambda_{\min}}$ são a radiância máxima e mínima expressas em $Wm^{-2}sr^{-1}$, da mesma forma $ND_{\lambda_{\max}}$ e $ND_{\lambda_{\min}}$ são os Números Digitais máximo e mínimo para o sensor e banda (metadados) em questão utilizados na transformação e ND é o número digital médio das amostras. Para esta etapa fez-se uso de dados proveniente dos metadados que estão disponíveis no ANEXO A.

A transformação realizada por meio da Equação 22 só foi possível, pelo fato do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8 estar calibrado, e é disponibilizado aos usuários o arquivo de metadados contendo as informações das radiâncias ou fatores aditivos e multiplicativos (estes últimos uma alternativa para realizar a transformação), necessários para os cálculos.

Nesta etapa de transformação dos NDs em radiância (L), foram geradas planilhas eletrônicas visando a organização das informações obtidas e realizados os referidos cálculos, para a transformação dos dados das imagens do satélite Landsat 8.

A primeira planilha referente aos dados das amostras foi organizada, contendo as seguintes informações: valores de $L_{\lambda_{\max}}$, $L_{\lambda_{\min}}$, $ND_{\lambda_{\max}}$, $ND_{\lambda_{\min}}$ extraídos dos metadados do satélite Landsat 8 (referência); ID da amostra; NDs do Landsat 8; valor da radiância calculada para o Landsat 8 e NDs do CBERS-4A, para as bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente.

Uma vez obtida a radiância do Landsat 8, fez-se necessário normalizar os dados para mesmo ângulo solar em relação ao satélite CBERS-4A, para tal aplicou-se o Fator do ângulo Zenital Solar (FZS), que foi obtido pela divisão dos cossenos dos ângulos zenitais solar do Landsat 8 pelo do CBERS-4A. Entretanto, os dados fornecidos pelos fabricantes nos metadados são referentes a elevação do Sol em relação ao plano do horizonte, isto é o ângulo vertical solar. Portanto, fez-se necessário converter primeiramente estes ângulos verticais em ângulos zenitais, subtraindo 90° dos mesmos. Convertidos os ângulos, a Equação 23 demonstra como foi obtido o FZS:

$$FZS = \frac{\cos(Z_{Landsat\ 8})}{\cos(Z_{CBERS-4A})} \quad (23)$$

Onde: FZS é o fator do ângulo zenital solar; $\cos(Z_{Landsat\ 8})$ é o cosseno do ângulo zenital solar do sensor OLI a bordo do Landsat 8; e $\cos(Z_{CBERS\ 4A})$ é o cosseno do ângulo zenital solar do sensor MUX a bordo do CBERS-4A.

Este fator, é uma correção necessária visto que os satélites no momento da tomada das imagens não estavam sob a mesma iluminação devido a esta angulação, o que causa alterações nos resultados obtidos, de formas distintas para cada banda, incluindo a presença de sombra. Maiores informações sobre os efeitos da variação do ângulo zenital solar em imagens orbitais, vide Breunig *et al.* (2014).

Determinado o fator de ajuste, este foi dividido pelos valores das radiâncias para cada banda do Landsat 8 visando garantir a qualidade das etapas subsequentes, que se tratou da correlação das radiâncias agora corrigidas do efeito do ângulo zenital solar do sensor OLI do Landsat 8 e dos NDs do CBERS-4A para a determinação dos parâmetros de calibração entre os sensores.

Uma vez convertidos os valores dos NDs em radiância (L) para o satélite Landsat 8, a etapa subsequente consistiu em gerar os gráficos de dispersão e visando obter a equação da reta ajustada e seus coeficientes angular (a) e linear (b), também denominados de coeficientes de regressão (Figura 19). Estes coeficientes são base para o cálculo dos parâmetros de calibração

($L_{\lambda_{\max}}$ e $L_{\lambda_{\min}}$) do sensor a ser calibrado, isto é, do sensor do satélite CBERS-4A, obtidos pelas Equações 24 e 25, completando parte da planilha eletrônica gerada das amostras:

$$L_{\lambda_{\min}} = \frac{ND_{\min} - b}{a} \quad (24)$$

$$L_{\lambda_{\max}} = \frac{ND_{\max} - b}{a} \quad (25)$$

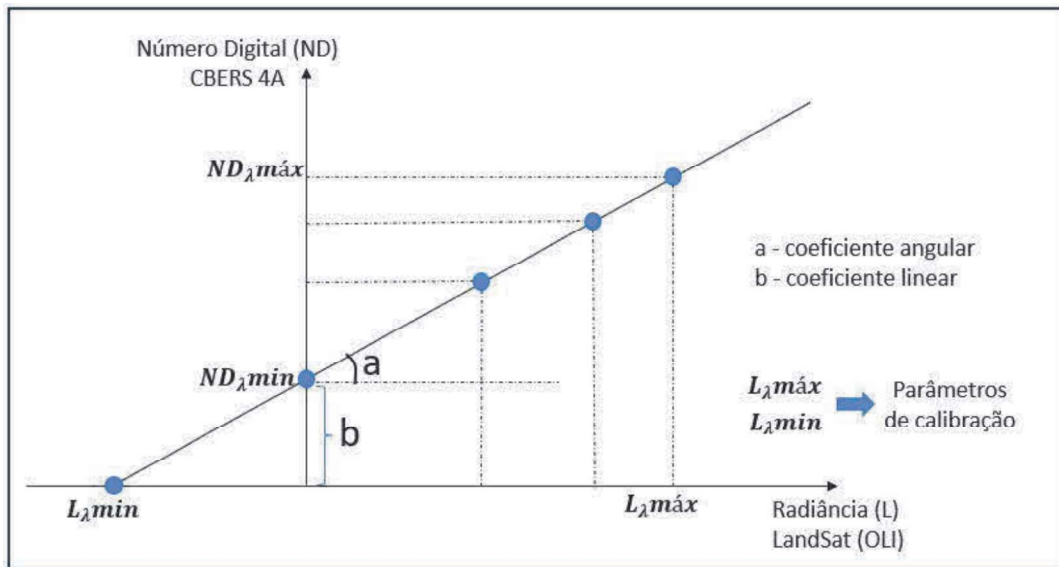


Figura 19: Gráfico da correlação entre os dados dos sensores de referência e o a ser calibrado.
Fonte: O Autor (2023).

Com o resultado da correlação, foram obtidos 8 parâmetros de calibração ($L_{\lambda_{\max}}$ e $L_{\lambda_{\min}}$) visto que são obtidos 2 parâmetros para cada banda (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), que permitiram transformar os NDs da imagem do CBERS-4A em radiância (L). Nesta etapa, todos os valores da imagem do CBERS-4A que foram convertidos para radiância, passam a ter as características físicas de interesse a nível de satélite, ou seja, no topo da atmosfera.

A Figura 19 ilustra o processo de correlação, destacando a etapa de determinação da reta de melhor ajuste entre os valores de números digitais (NDs) a serem convertidos em radiância (L) para o sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A.

Os valores dos coeficientes de regressão da reta ajustada são obtidos desta correlação, sendo que os valores de ND máximo e mínimo são relativos à resolução radiométrica do sensor, neste caso do CBERS-4A, 8 bits, fazendo 2^n , isto é, $2^8 = 256$, indica que o sensor armazena 256 níveis de cinza, variando de 0 a 255, que são os $ND_{\lambda_{\min}}$ e $ND_{\lambda_{\max}}$, respectivamente. Aplicando as Equações 25 e 26, tem-se os valores de radiância máxima e mínima ($L_{\lambda_{\max}}$ e $L_{\lambda_{\min}}$) para cada banda do sensor MUX a bordo do CBERS-4A, obtidas através da calibração cruzada, com os valores provenientes do sensor do Landsat 8. De posse destes valores, aplica-se a Equação 23 e tem-se o valor da radiância (L) para cada banda da imagem.

Para esta etapa foi realizada análise dos pressupostos estatísticos do modelo de regressão linear simples, para garantir a confiabilidade do modelo aplicado neste estudo. Os pressupostos

incluem a linearidade da relação entre as variáveis, a normalidade, a homoscedasticidade (variância constante) e a independência dos erros.

Obtidos os parâmetros de calibração entre as imagens dos sensores dos satélites Landsat 8 e CBERS-4A, inicia-se a segunda parte da metodologia proposta, que tratou da validação destes valores obtidos para cada banda.

3.3.3 Segunda etapa – validação dos parâmetros de calibração

A etapa de validação da calibração cruzada dos sensores do Landsat 8 e CBERS-4A, teve como metodologia proposta e aplicada as fases apresentadas no fluxograma da Figura 20.



Figura 20: Fluxograma da metodologia proposta para validar os parâmetros de calibração.

Fonte: O Autor (2024).

A área utilizada para a validação foi definida por apresentar solo preparado para plantio (solo exposto) e ter pouca variação da reflectância, situada no campus Seropédica da UFRRJ (Figura 13). A área é de aproximadamente 80 m x 130 m onde foram distribuídos vinte e quatro (24) pontos amostrais uniformemente posicionados.

A partir de imagem georreferenciada, foram obtidas as coordenadas de amostras pré-determinadas no terreno, garantindo sua visualização na imagem. Por essa razão, a região selecionada precisava apresentar a maior homogeneidade possível.

O intuito deste processo era que cada amostra que fosse obtida no solo com o espectrorradiômetro, fosse concomitantemente detectada pelo sensor do CBERS-4A na área de estudo e consequentemente armazenada em um pixel durante a sua passagem pela área, visando uma posterior comparação desta informação no momento do processamento dos dados.

Para esta etapa, nova aquisição de imagens fez-se necessária, onde os procedimentos seguiram a mesma metodologia descrita na etapa anterior, utilizando o site do INPE, com acesso por meio do portal gov.br e utilizou-se novamente o calendário das passagens dos dias e hora dos satélites. Isto deve-se ao fato da necessidade de adotar o mesmo critério da primeira parte

da pesquisa, isto é, os dados coletados em campo com o espectrorradiômetro e a imagem do sensor a bordo do CBERS-4A tinham que ser obtidos de forma simultânea, visando a validação da calibração cruzada.

Adicionalmente, a escolha criteriosa de área de estudo não excessivamente extensa é essencial, pois a demora na coleta dos dados pode gerar incertezas adicionais devido às mudanças no ângulo zenital solar e aumentar a probabilidade de mudanças nas condições atmosféricas.

Definida a segunda área de estudo, a distribuição uniforme dos pontos amostrais e o calendário de passagem do CBERS-4A sobre a região, iniciou-se o planejamento de campo para a coleta das amostras com o espectrorradiômetro. A coleta foi realizada no dia 13/05/2024, tendo início às 09:30h e teve duração de aproximadamente 1 hora. Os procedimentos de campo foram programados de forma a adequar com a data e horário de coincidência da passagem do satélite CBERS-4A que foi às 10:27h para o local de estudo. O mapa de localização, bem como a distribuição dos 24 pontos coletados podem ser visualizados na Figura 21.



Figura 21: Distribuição das amostras para validação dos parâmetros de calibração.

Fonte: O Autor (2024).

O procedimento de campo foi realizado levando-se em consideração alguns critérios, tais como as especificações do espectrorradiômetro *FieldSpec® 4 Standard Resolution* da *ASD Inc. (PANalytical company)* utilizado que possui um campo de visão (*Field Of View - FOV*) de 25°, a faixa espectral do aparelho abrange comprimentos de onda entre 350 e 2500 nm. Ao ligar o espectrorradiômetro foi realizada a checagem das fibras óticas com o *software Fiber Check*, permitindo analisar se as 19 fibras, de cada conjunto de detectores, se estavam funcionando em perfeito estado.

Checadas as fibras óticas, ajustou-se a sensibilidade do sensor óptico do equipamento para a quantidade de energia disponível, realizando a otimização do aparelho e definindo a

referência branca. Ambos procedimentos foram realizados com a placa de *Spectralon*, que é uma placa utilizada como referência. Findados estes procedimentos, foram iniciadas as leituras espectrais das amostras no solo, utilizando o *Pistol Grip* da ASD Inc., representado na Figura 22.



Figura 22: Coleta de dados das amostras de solo com o espectrorradiômetro.

Fonte: O Autor (2024).

Ao todo, foram realizadas quarenta e oito (48) leituras de amostras sendo vinte e quatro (24) de solo e vinte e quatro (24) da placa de referência (*Spectralon*). As amostras coletadas foram as mesmas pré-determinadas em laboratório, distribuídas uniformemente na área de estudo e foram localizadas em campo por meio de locação de pontos pelo método relativo cinemático em tempo real (do inglês, *Real Time Kinematic* – RTK) com um receptor GNSS RTK da Topcon®.

A visibilidade horizontal aproximada da área de estudo era de 10 km (Figura 23), sem a presença de nuvens no céu sobre as áreas na data do levantamento de campo. As coletas foram realizadas tendo em vista que a luz solar estava sempre ao lado direito do manuseio do instrumento, mantendo uma distância do *Pistol Grip* do corpo do usuário, visando minimizar interferências radiométricas, motivo pelo qual o operador do equipamento também estava com vestimentas na cor preta.



Figura 23: Área de solo exposto e de coleta das amostras de validação com o espectrorradiômetro.

Fonte: O Autor (2024).

Posteriormente à coleta das amostras em campo, foi feito o processamento dos dados coletados com o espectrorradiômetro, em radiância, no software *View Spec Pro*®. Para tal foram geradas novas planilhas eletrônicas, contendo as seguintes informações: comprimento de onda; radiância refletida pela superfície terrestre (L_{alvo}), obtida diretamente na superfície de interesse (solo); radiância da placa incidente (L_{placa}), obtida utilizando uma placa de referência branca, posicionada horizontalmente para captar a radiância incidente da luz solar; e a reflectância da placa (ρ_{placa}), que é obtida pela seleção da opção no equipamento denominado de “*White Reference*” seguido da leitura da placa, que nada mais é que um fator de calibração da placa.

As leituras da placa foram realizadas anteriormente a cada uma das vinte e quatro (24) leituras do solo, sendo esta metodologia necessária para calcular a reflectância do solo para cada ponto conforme Equação 26, pois a quantidade de energia disponível sofre variações ao longo do tempo, enquanto as medidas em campo estavam sendo obtidas.

$$\rho_{campo} = \frac{L_{alvo}}{L_{placa}} \cdot \rho_{placa} \quad (26)$$

Onde: ρ_{campo} é o fator de reflectância; L_{alvo} é a radiância do alvo; L_{placa} é a radiância da placa; e ρ_{placa} é a reflectância da placa.

Com os dados coletados em campo, foi organizada planilha eletrônica para a validação, onde os próximos dados a serem inseridos e organizados foram os provenientes do CBERS-4A, visto que a passagem do satélite e aquisição da imagem foi realizada de forma concomitante com as amostras de terreno. Entretanto, anteriormente a esta etapa, fez-se uma checagem da ocorrência de *outliers* nos dados provenientes do espectrorradiômetro. A presença de *outliers* pode ocorrer porque os dados de campo foram obtidos fora de um ambiente controlado de laboratório e o equipamento sensível a condições ambientais.

Para as 24 amostras coletadas no terreno e na placa, totalizando 48 medidas com o espectrorradiômetro, e para cada comprimento de onda que o equipamento fez a leitura, isto é, de 350 nm a 2500 nm, o volume de informações é substancial. Desta forma a primeira opção de verificação de *outlier* foi via *Boxplot* ou diagrama de caixa ou o método de Intervalo entre quartis (IQR), o que resultaria em mais de 2000 diagramas de caixa, o que tornou a análise somente gráfica (visual) inviável.

Dessa forma, optou-se pela análise numérica onde foram calculados os valores, baseados na estatística descritiva, de máximo, mediana, mínimo, 1º quartil, 3º quartil, IQR, limite superior e inferior para cada amostra em todos comprimentos de ondas do espectrorradiômetro. Com os referidos valores obtidos foi aplicado um comando da planilha eletrônica, que trabalha como um filtro, detectando valores que extrapolassem os limites máximos e mínimo, onde desta forma foi possível verificar a ocorrência ou não, de *outliers* nas amostras.

Em paralelo, foram criados uma tabela e um gráfico dinâmicos para permitir a rápida seleção e visualização de amostras caso fossem detectadas a presença de *outliers*. Esses gráficos, baseados no comprimento de onda, destacam os *outliers*, caso existam, em relação aos limites máximos, mínimos e à mediana, conforme ilustrado na Figura 24.

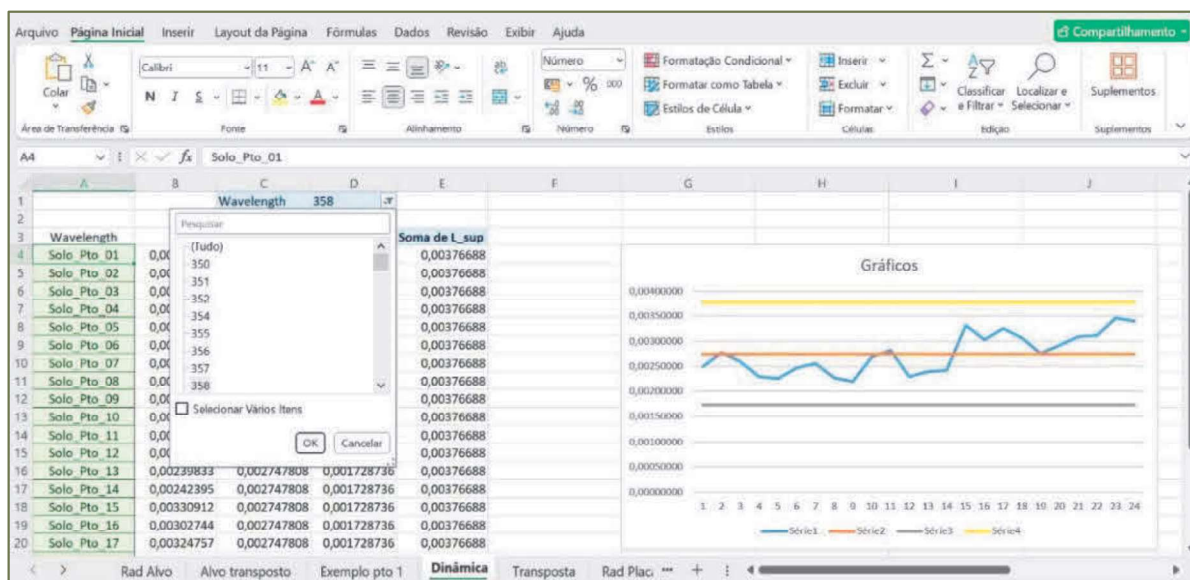


Figura 24: Planilha e gráfico dinâmico para detecção de *outliers*.

Fonte: O Autor (2024).

Aplicados os testes descritos nos dados das amostras, a etapa subsequente consistiu em organizar na planilha eletrônica com os dados provenientes do sensor do satélite CBERS-4A. Entretanto, analisando as imagens e devido a sensibilidade do equipamento com relação a qualquer mudança no ambiente fora de um laboratório, e devido ao fato de vinte e quatro (24) pontos que foram selecionados como amostra, possuírem uma região que no entorno tem área de vegetação e uma estrada de chão irregular, distinta das condições da área de estudo, optou-se por retirar algumas das amostras que estivessem contidas nesta situação.

Diante do exposto, os pontos amostrais retirados do estudo foram os localizados próximos as bordas da área de estudo, sendo denominados de 1, 4, 5, 9, 10, 14, 19 e 20. Este critério foi adotado visando minimizar efeitos indexáveis, e desta forma as amostras concentraram-se na região de maior homogeneidade do terreno (Figura 25). Desta forma, para

o resultado da validação foram utilizados dezesseis (16) pontos amostrais no centro da área homogênea, de solo exposto, idealmente preconizados para validação da calibração cruzada.



Figura 25: Distribuição das amostras filtradas para validação dos parâmetros de calibração.
Fonte: O Autor (2024).

As Funções de Resposta Normalizadas (FRNs) para as bandas do sensor CBERS-4A foram obtidas a partir da documentação técnica fornecida pelos fabricantes (INPE, 2023). Estas funções descrevem a sensibilidade do sensor em diferentes comprimentos de onda e são essenciais para ponderar corretamente as medições de radiância do sensor do espectrorradiômetro, para que sejam o mais equivalentes possível com os dados do sensor do CBERS-4A, critério importante visando a validação dos dados.

Destaca-se que neste momento foram tomados os devidos cuidados em relação a posição em que estes dados foram inseridos na planilha eletrônica, pois as medidas, relacionados ao CBERS-4A contemplam intervalos de comprimentos de onda (366 nm a 1000 nm) inferiores ao do espectrorradiômetro (350 nm a 2500 nm). Diante do exposto, os dados foram organizados de forma que os valores fossem inseridos para os mesmos intervalos, para todas bandas e dados de campo.

Sendo assim, foram multiplicadas cada FRN relativa a um comprimento de onda específico pelo seu equivalente em função da radiância de cada banda do sensor a bordo do CBERS-4A. Por exemplo, para o comprimento de onda de 366 nm, fez-se: FRN x B5; FRN x B6; FRN x B7; e FRN x B8, e assim sucessivamente para os próximos comprimentos de ondas.

Após este processo obteve-se a radiância do alvo em função de resposta normalizada do sensor. Da mesma forma que foi realizado este refinamento das radiâncias para o alvo, e o processo foi repetido para as medidas realizadas na placa de *Spectralon*.

Contudo os valores ainda precisaram ser ajustados em função da correção da placa de referência do espectrorradiômetro. Para tal, foi utilizado o valor da FRN multiplicado pelo radiância medida na placa dividido pelo valor da reflectância da placa, dada pela função “*White Reference*” para cada comprimento de onda.

Normalizadas as medidas de interesse do alvo e placa, o prosseguimento da metodologia da pesquisa, consistiu na etapa do cálculo da reflectância normalizada (ρ_{alvo}) para cada banda espectral do sensor CBERS-4A. Este cálculo envolveu a integração da reflectância dos alvos em campo ponderada pela FRN do sensor, sendo obtido pela Equação 27:

$$\rho_{alvo} = \frac{\sum(L_{alvo} \cdot FRN)}{\sum\left(\frac{L_{placa} \cdot FRN}{\rho_{placa}}\right)} \quad (27)$$

Onde: ρ_{alvo} é a reflectância normalizado do alvo (solo); L_{alvo} é a radiância do alvo (solo); FRN é a Função de Resposta Espectral Normalizada para a banda; L_{placa} é a radiância da placa; e ρ_{placa} é a reflectância obtida no campo.

Destaca-se que na Equação (28), o numerador nada mais é que o somatório do que foi calculado no processo de obtenção da radiância normalizada dos alvos e o denominador é o somatório da razão entre a radiância normalizada da placa e a reflectância da placa. Como resultado, obteve-se a reflectância normalizada para cada ponto amostral em relação a cada banda do sensor a bordo do satélite CBERS-4A.

O cálculo da reflectância normalizada é um passo para ajustar as medições de campo à sensibilidade espectral do sensor CBERS-4A. Utilizando as FRNs, as medições de reflectância são integradas e ponderadas corretamente, permitindo a calibração cruzada precisa entre diferentes sensores de observação da Terra.

A etapa subsequente consistiu na correção atmosférica da imagem do sensor MUX do CBERS-4A da região da UFRRJ onde estão localizados os dezesseis (16) pontos, que foram utilizados para a coleta dos dados de campo com o espectrorradiômetro.

Para o processo da remoção do efeito atmosférico foi utilizado o modelo físico 6S, desenvolvido por Vermote *et al.* (1997) e adaptado por Antunes *et al.* (2012) no qual os dados de entrada para o estudo foram: ângulo zenital solar; azimuth solar; zênite de visada; azimuth de visada; data (mês, dia); modelo de correção atmosférica gasosa (tropical); modelo de aerossóis (continental); visibilidade (10km); altitude local ($\cong 20m$); função de resposta normalizada; ND_{max} e ND_{min} ; L_{max} e L_{min} ; além do número total de pixels da imagem. Como saída foi obtida a imagem CBERS 4A em reflectância da superfície, isto é, corrigida para os efeitos atmosféricos.

Neste processo no qual foi removido o efeito atmosférico do sensor MUX do CBERS-4A, para a região da UFRRJ, obteve-se como resposta a reflectância dos dados com informações agora referentes a nível de superfície, para que pudessem ser comparadas com os dados provenientes do levantamento de campo, com o espectrorradiômetro, conforme exposto na Figura 26.

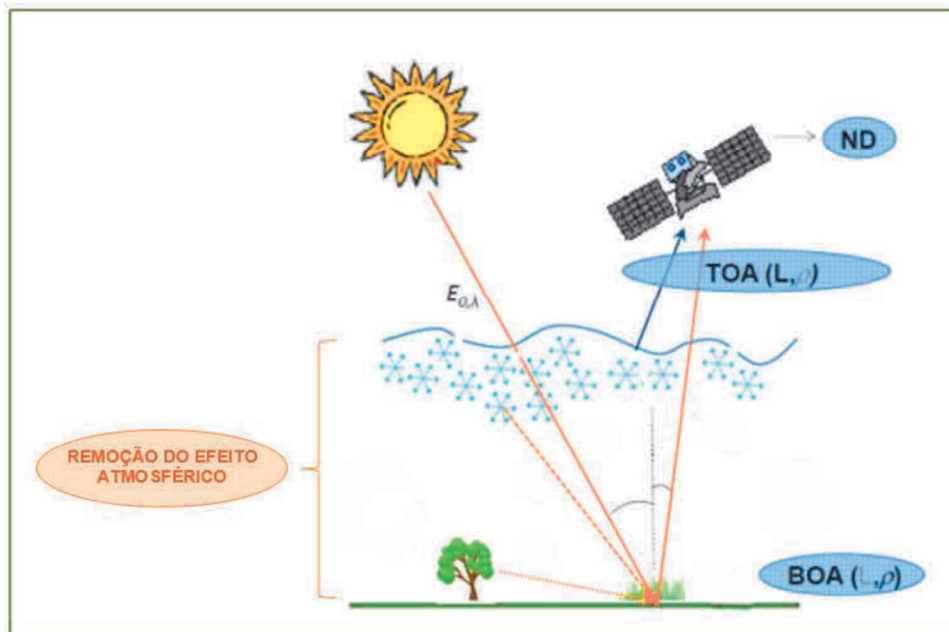


Figura 26: Correção do efeito atmosférico para validação a nível de superfície.

Fonte: Adaptado de Barba (2019).

Legenda: Irradiância (E), Número digital (ND), Topo da Atmosfera (TOA) e Base da Atmosfera (BOA).

Adicionalmente a comparação dos valores das reflectâncias para os dezesseis (16) pontos amostrais entre a imagem calibrada e os dados proveniente do levantamento de campo, também foi realizada uma comparação entre as duas imagens, a nível de superfície, obtidas dos sensores a bordo dos satélites Landsat 8 e do Sentinel 2A, ambos calibrados, com a data de 12/05/2024 na região da UFRRJ (dia anterior ao levantamento de campo realizado, com condições atmosféricas semelhantes, dia de passagem concomitante entre estes dois satélites).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Áreas de Estudo – Salar de Uyuni e UFRRJ

A primeira área de estudo foi definida como sendo o Salar de Uyuni, na Bolívia, devido as suas características consideradas ideais para a calibração de sensores orbitais e que serviu de base para a etapa da determinação dos coeficientes de calibração. A segunda, por sua vez, destinada à validação dos parâmetros determinados pela calibração cruzada, consistiu em área de solo exposto considerada homogênea, localizada no campus Seropédica da UFRRJ. Os mapas das referidas áreas de estudo foram apresentados, respectivamente, nas Figuras 9 e 10 no Capítulo 3.

As imagens adquiridas pelos sensores OLI a bordo do satélite Landsat 8 e pelo MUX a bordo do CBERS-4A, ambas obtidas na data de 05/01/2024, para a região do Salar de Uyuni, podem ser visualizadas, sobrepostas, na Figura 27.

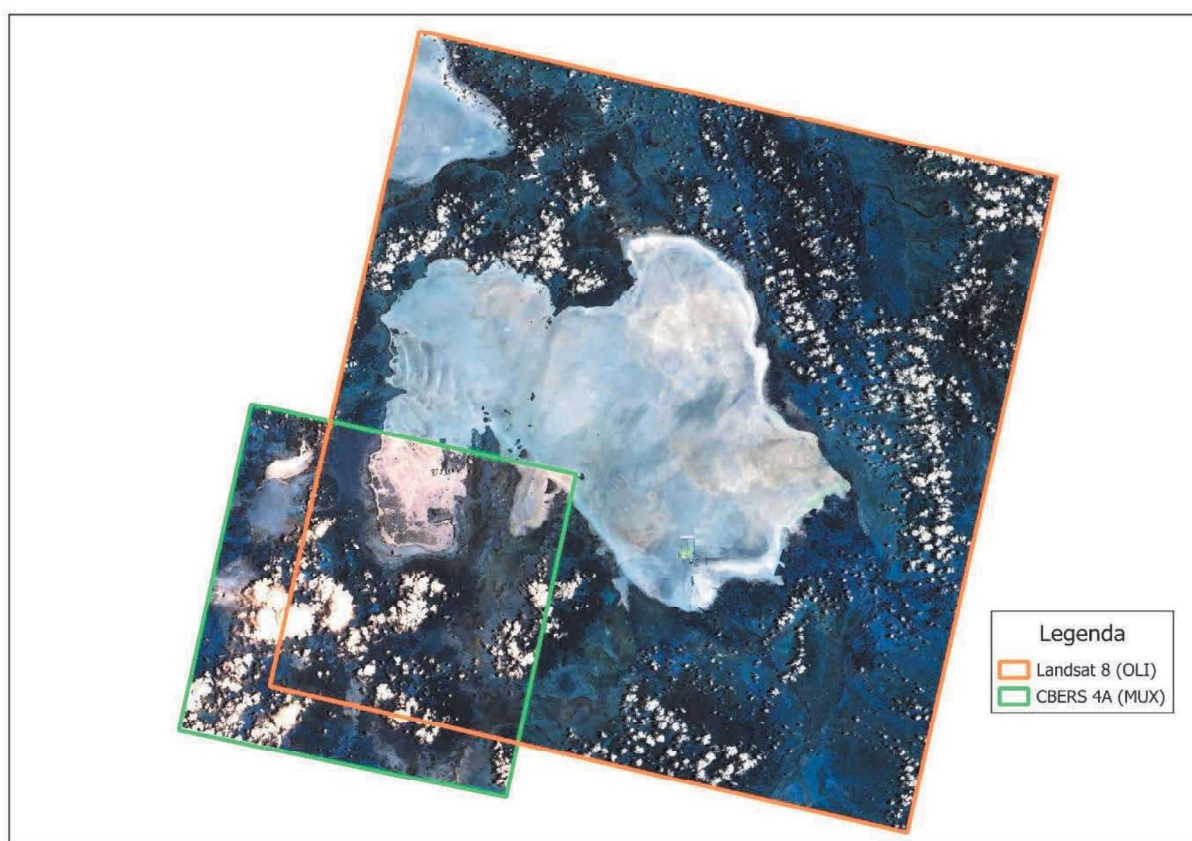


Figura 27: Imagens obtidas do sensor OLI do Landsat 8 e do sensor MUX do CBERS-4A, do Salar de Uyuni.

Fonte: O Autor (2024).

Além da questão das faixas de imageamento serem de diferentes larguras, os satélites Landsat 8 e CBERS-4A não possuem coincidência espacial plena sobre a mesma órbita, mas em órbitas próximas, não sendo possível ter uma sobreposição perfeita das cenas na região de estudo. Para este trabalho procurou-se obter imagens livres de nuvens na área de sobreposição do Salar para a data de passagem concomitante dos satélites.

4.2 Amostras das Imagens dos Sensores dos Satélites Landsat 8 e CBERS-4A

Primeiramente, foram coletadas amostras na região de sobreposição das imagens, selecionados devido a uniformidade de NDs, sendo estas amostras referentes a cada uma das bandas dos sensores (Figura 28).

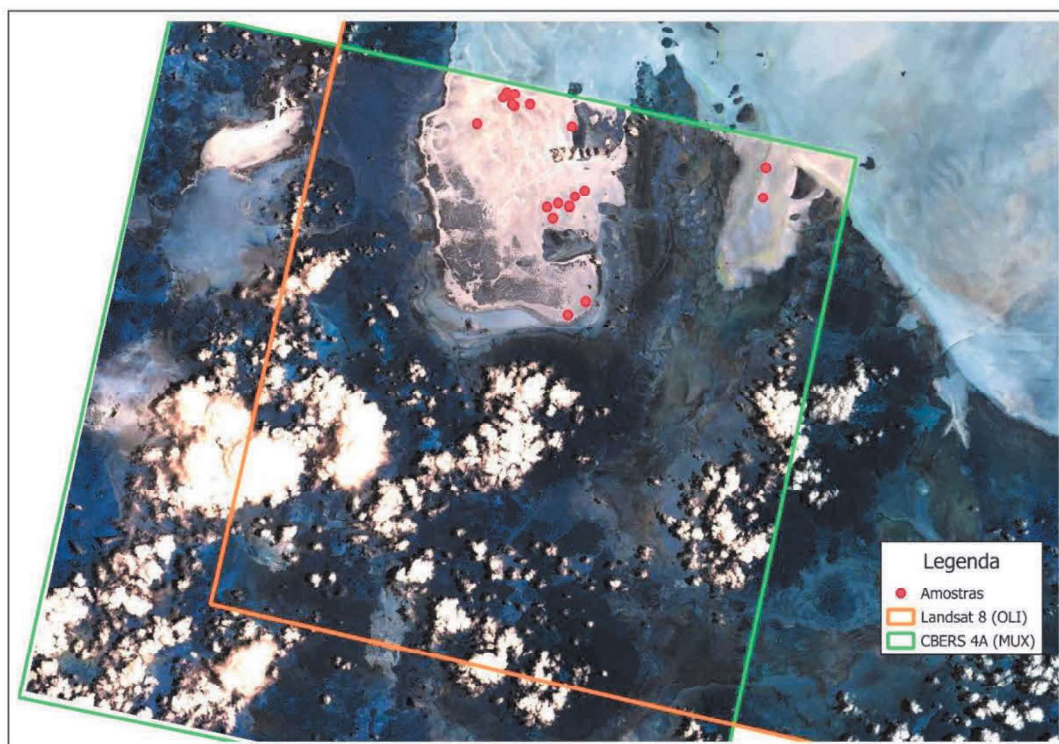


Figura 28: Amostras na área de sobreposição das imagens obtidas do sensor OLI do Landsat 8 e do sensor MUX do CBERS-4A, do Salar de Uyuni.

Fonte: O Autor (2024).

Foram obtidos os valores dos NDs médios de cada uma das 24 amostras coletadas, os quais podem ser visualizados na Tabela 17, para as bandas azul (B2/B5), verde (B3/B6), vermelho (B4/B7) e infravermelho próxima (B5/B8), bem como suas análises estatísticas descritivas. Cada amostra consistia de uma área de 60 por 60 metros, contendo 4 pixels no sensor OLI Landsat 8 e 16 pixels no MUX CBERS-4A. Os termos dentro dos parênteses indicam os nomes das referidas bandas dos sensores dos satélites Landsat 8 e CBERS-4A, respectivamente.

A distinção na magnitude dos valores de NDs entre os sensores do Landsat 8 e do CBERS-4A, se justifica, pela resolução radiométrica de cada sensor, dada por (2^n) onde n é o número de bits. Logo, para o Landsat 8, sendo 16 bits, tem uma variação de 65.536 NDs, já o CBERS-4A, sendo 8 bits, apenas 256 NDs.

Tabela 17: Valor médio dos NDs e análise estatística descritiva obtidos para cada amostra sobre as bandas do azul (OLI - B2 e MUX - B5), verde (OLI - B3 e MUX - B6), vermelho (OLI - B4 e MUX - B7) e infravermelho (OLI - B5 e MUX - B8).

Salar Uyuni								
Am	B2/B5		B3/B6		B4/B7		B5/B8	
	ND Landsat	ND CBERS	ND Landsat	ND CBERS	ND Landsat	ND CBERS	ND Landsat	ND CBERS
Am_1	23936,9223	231,0000	24975,7313	213,0000	27249,7143	209,7500	29588,0885	194,2500
Am_2	22089,5624	206,0000	22811,4144	187,5000	24756,8770	183,5000	26925,1656	170,0000
Am_3	22370,6062	213,5000	23634,8568	198,0000	26201,4226	197,7500	29114,9608	186,2500
Am_4	23077,9688	221,0000	23571,1042	200,0000	25314,9104	191,5000	27166,3079	174,0000
Am_5	23960,5667	231,4646	24774,4353	210,0000	26866,0123	204,0000	29072,4435	187,4646
Am_6	22678,2663	214,5000	23270,5653	194,5000	25072,6680	189,0000	26935,9577	172,5000
Am_7	24094,2993	228,5000	25635,2809	214,5000	28568,6426	215,7500	31317,7532	201,5000
Am_8	23605,8613	225,5000	25140,1944	213,0000	28110,1936	215,0000	30861,0216	202,0000
Am_9	22986,1175	217,7500	24484,1959	205,5000	27422,6861	208,2500	30074,3135	195,2500
Am_10	23358,3232	221,5000	24948,7077	210,0000	27878,1009	212,0000	30484,9728	198,0000
Am_11	23137,7806	219,5000	24920,6952	209,7500	28078,5343	214,5000	30974,9927	202,0000
Am_12	24026,0000	229,0839	25793,0000	218,0000	28927,0000	222,7481	31802,0000	207,9160
Am_13	22978,7593	216,5000	24778,6296	210,5000	27803,6863	214,5000	27295,9533	185,7500
Am_14	22475,5000	210,2000	23887,0000	201,6000	26621,7500	204,0000	26036,2500	174,7000
Am_15	9871,0000	71,6363	10433,2500	71,2727	11793,7500	75,7272	11701,5000	67,3636
Am_16	26077,2500	255,0000	26854,2500	230,1250	28914,5000	221,6875	30718,5000	201,0625
Am_17	24194,5555	233,2083	25408,2222	217,0833	27938,1111	214,6666	30259,6666	198,4583
Am_18	10286,7500	67,8888	10458,2500	62,5555	11648,2500	66,1111	12542,7500	63,2222
Am_19	21357,0000	194,1428	22750,3333	184,7142	25557,0000	188,8571	28278,3333	178,8571
Am_20	19167,5000	176,2222	21480,5000	176,3333	24704,2500	186,4444	27610,5000	178,5555
Am_21	14182,0604	114,2500	15346,0263	112,7500	17607,7920	122,7500	21131,0153	128,7500
Am_22	23164,3331	215,7500	24631,8955	203,5000	27474,6397	206,5000	30042,9933	193,2500
Am_23	24378,7053	234,0000	25616,3545	216,5000	28358,7605	216,5000	30450,0140	199,5000
Am_24	23940,6193	225,7500	25408,6739	212,7500	28271,5647	214,5000	30795,8590	200,0000
Média	21724,8461	203,0769	22958,89864	190,5597	25464,2007	191,4996	27549,2213	177,5250
Mínimo	9871,0000	67,8888	10433,25000	62,5555	11648,2500	66,1111	11701,5000	63,2222
Máximo	26077,2500	255,0000	26854,25000	230,1250	28927,0000	222,7481	31802,0000	207,9160
DP	4133,2041	47,6592	4344,31295	43,2418	4728,9455	41,5041	5175,3377	37,5635

Fonte: O Autor (2024).

Legenda: Amostra (Am), Número Digital (ND), Desvio Padrão (DP).

4.3 Conversão dos NDs em Radiância (L) para cada Banda do Landsat 8

O resultado das transformações dos NDs em radiância (L), das amostras em cada banda, dada pela Equação 22, para a imagem do Landsat 8, podem ser visualizados nas Tabelas 20, 21, 22 e 23 para as bandas azul (B2/B5), verde (B3/B6), vermelho (B4/B7) e infravermelho próximo (B5/B8), respectivamente.

Nas três primeiras linhas das Tabelas 18 a 21 estão descritos os valores provenientes do metadados do Landsat 8 onde constam os parâmetros de calibração (L_{\max} e L_{\min}), os números digitais (ND_{\max} e ND_{\min}), o número digital do pixel da primeira amostra (ND_{pixel}) e o valor da

radiância (L) obtida para esta amostra da banda. Já nas linhas quatro e cinco das referidas tabelas, constam os coeficientes de calibração, ganho (Ad) e *offset* ($Mult$), que são uma segunda forma de realizar a transformação de NDs em radiância, o número digital do pixel da primeira amostra (ND_{pixel}) e o valor da sua radiância (L) obtida para a banda. Nas linhas seis e sete estão os valores dos ângulos de elevação solar dos satélites Landsat 8 e CBERS-4A.

Estes valores foram inseridos nas tabelas, apenas para conferência dos cálculos que estão sendo executados e de certa forma, para comprovar que independentemente de qual variável se utilize dos metadados do sensor calibrado, sejam eles os valores de L_{max} ou L_{min} , ou ganho e offset, o valor da radiância (L) obtido para cada banda são os mesmos valores.

Os valores dos ângulos de elevação solar do Landsat 8 e do CBERS-4A contidas na sexta e sétima linha, respectivamente, das Tabelas 18 a 21 são provenientes dos metadados dos satélites e serviram para calcular o denominado Fator de Ajuste do Ângulo Zenital Solar (FZS) (linha 8 das Tabelas 18 a 21). Este fator, é uma correção necessária visto que os satélites no momento da tomada das imagens não estavam sob a mesma iluminação devido a esta angulação, o que causa alterações nos resultados obtidos, de formas distintas para cada banda, incluindo a presença de sombra.

O FZ_s é obtido pela divisão dos cossenos dos ângulos zenitais solar do Landsat 8 pelo do CBERS-4A. Entretanto, os dados fornecidos pelos fabricantes nos metadados são referentes a elevação do Sol em relação ao plano do horizonte, isto é o ângulo vertical solar. Portanto, fez-se necessário converter primeiramente estes ângulos verticais em ângulos zenitais, subtraindo 90° dos mesmos. Convertidos os ângulos, pela Equação 27. A radiância corrigida é obtida dividindo-se a radiância calculada das bandas do Landsat por FZ_s .

Tabela 18: Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda azul (B2).

Salar Uyuni				
$L_{\max} = 804,9355 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		$L_{\min} = -66,4718 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		
$ND_{\max} = 65535,0000$		$ND_{\min} = 1,0000$		
$ND_{\text{pixel}} = 23936,9223$		$L_{(L_{\max}, L_{\min})} = \mathbf{251,8047 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}}$		
$Ad = -66,4851$		$Mult = 0,0133$		
$ND_{\text{pixel}} = 23936,9223$		$L_{(\text{ganho}, \text{offset})} = \mathbf{251,8041 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}}$		
Ang. Elev. Solar Landsat 8		60,9035 (°)		
Ang. Elev. Solar CBERS-4A		68,4402 (°)		
Fator do ângulo zenital solar (FZS)		0,93954		
Amostra	ND Landsat (B2)	Radiância (L) (Wsr ⁻¹ m ⁻²)	ND CBERS (B5)	Radiância (L) Landsat ajustada para o FZ _s
Am_1	23936,9223	251,8047	231,0000	268,0093
Am_2	22089,5624	227,2403	206,0000	241,8641
Am_3	22370,6062	230,9774	213,5000	245,8416
Am_4	23077,9688	240,3832	221,0000	255,8528
Am_5	23960,5667	252,1191	231,4646	268,3439
Am_6	22678,2663	235,0683	214,5000	250,1959
Am_7	24094,2993	253,8974	228,5000	270,2366
Am_8	23605,8613	247,4026	225,5000	263,3239
Am_9	22986,1175	239,1619	217,7500	254,5528
Am_10	23358,3232	244,1111	221,5000	259,8205
Am_11	23137,7806	241,1785	219,5000	256,6993
Am_12	24026,0000	252,9892	229,0839	269,2700
Am_13	22978,7593	239,0640	216,5000	254,4487
Am_14	22475,5000	232,3722	210,2000	247,3262
Am_15	9871,0000	64,7698	71,6363	68,9380
Am_16	26077,2500	280,2647	255,0000	298,3008
Am_17	24194,5555	255,2305	233,2083	271,6555
Am_18	10286,7500	70,2980	67,8888	74,8220
Am_19	21357,0000	217,4994	194,1428	231,4963
Am_20	19167,5000	188,3856	176,2222	200,5089
Am_21	14182,0604	122,0941	114,2500	129,9513
Am_22	23164,3331	241,5316	215,7500	257,0750
Am_23	24378,7053	257,6791	234,0000	274,2617
Am_24	23940,6193	251,8539	225,7500	268,0616

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 19: Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda verde (B3).

Salar Uyuni				
$L_{\max} = 741,7412 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		$L_{\min} = -61,2532 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		
$ND_{\max} = 65535,0000$		$ND_{\min} = 1,0000$		
$ND_{\text{pixel}} = 24975,7313$		$L_{(L_{\max}, L_{\min})} = \mathbf{244,7645 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}}$		
$Ad = -61,2654$		$Mult = 0,0122$		
$ND_{\text{pixel}} = 24975,7313$		$L_{(\text{ganho}, \text{offset})} = \mathbf{244,7621 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}}$		
Ang. Elev. Solar Landsat 8		60,9035 (°)		
Ang. Elev. Solar CBERS-4A		68,4402 (°)		
Fator do ângulo zenital solar (FZS)		0,93954		
Amostra	ND Landsat (B3)	Radiância (L) (Wsr ⁻¹ m ⁻²)	ND CBERS (B6)	Radiância (L) Landsat ajustada para o FZs
Am_1	24975,7313	244,7645	213,0000	260,5160
Am_2	22811,4144	218,2449	187,5000	232,2898
Am_3	23634,8568	228,3347	198,0000	243,0288
Am_4	23571,1042	227,5535	200,0000	242,1974
Am_5	24774,4353	242,2980	210,0000	257,8908
Am_6	23270,5653	223,8710	194,5000	238,2779
Am_7	25635,2809	252,8460	214,5000	269,1176
Am_8	25140,1944	246,7797	213,0000	262,6609
Am_9	24484,1959	238,7417	205,5000	254,1056
Am_10	24948,7077	244,4334	210,0000	260,1636
Am_11	24920,6952	244,0902	209,7500	259,7983
Am_12	25793,0000	254,7786	218,0000	271,1745
Am_13	24778,6296	242,3494	210,5000	257,9455
Am_14	23887,0000	231,4242	201,6000	246,3172
Am_15	10433,2500	66,5741	71,2727	70,8584
Am_16	26854,2500	267,7822	230,1250	285,0150
Am_17	25408,2222	250,0639	217,0833	266,1564
Am_18	10458,2500	66,8804	62,5555	71,1844
Am_19	22750,3333	217,4965	184,7142	231,4932
Am_20	21480,5000	201,9371	176,3333	214,9325
Am_21	15346,0263	126,7708	112,7500	134,9290
Am_22	24631,8955	240,5515	203,5000	256,0319
Am_23	25616,3545	252,6141	216,5000	268,8708
Am_24	25408,6739	250,0694	212,7500	266,1623

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 20: Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda vermelho (B4).

Salar Uyuni				
$L_{\max} = 625,4779 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		$L_{\min} = -51,6521 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		
$ND_{\max} = 65535,0000$		$ND_{\min} = 1,0000$		
$ND_{\text{pixel}} = 27249,7143$		$L_{(L_{\max}, L_{\min})} = \mathbf{229,8952 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}}$		
$Ad = -51,6625$		$Mult = 0,0103$		
$ND_{\text{pixel}} = 27249,7143$		$L_{(\text{ganho}, \text{offset})} = \mathbf{229,8270 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}}$		
Ang. Elevação Solar Landsat 8		60,9035 (°)		
Ang. Elevação Solar CBERS-4A		68,4402 (°)		
Fator do ângulo zenital solar (FZS)		0,93954		
Amostra	ND Landsat (B4)	Radiância (L) (Wsr ⁻¹ m ⁻²)	ND CBERS (B7)	Radiância (L) Landsat ajustada para o FZ _s
Am_1	27249,7143	229,8952	209,7500	244,6898
Am_2	24756,8770	204,1379	183,5000	217,2749
Am_3	26201,4226	219,0637	197,7500	233,1612
Am_4	25314,9104	209,9038	191,5000	223,4119
Am_5	26866,0123	225,9306	204,0000	240,4700
Am_6	25072,6680	207,4008	189,0000	220,7478
Am_7	28568,6426	243,5230	215,7500	259,1946
Am_8	28110,1936	238,7861	215,0000	254,1528
Am_9	27422,6861	231,6824	208,2500	246,5920
Am_10	27878,1009	236,3880	212,0000	251,6004
Am_11	28078,5343	238,4589	214,5000	253,8047
Am_12	28927,0000	247,2257	222,7481	263,1356
Am_13	27803,6863	235,6191	214,5000	250,7820
Am_14	26621,7500	223,4067	204,0000	237,7838
Am_15	11793,7500	70,1964	75,7272	74,7138
Am_16	28914,5000	247,0966	221,6875	262,9981
Am_17	27938,1111	237,0080	214,6666	252,2604
Am_18	11648,2500	68,6930	66,1111	73,1137
Am_19	25557,0000	212,4052	188,8571	226,0742
Am_20	24704,2500	203,5941	186,4444	216,6962
Am_21	17607,7920	130,2700	122,7500	138,6533
Am_22	27474,6397	232,2192	206,5000	247,1634
Am_23	28358,7605	241,3544	216,5000	256,8864
Am_24	28271,5647	240,4534	214,5000	255,9275

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 21: Transformações dos NDs em radiância (L) da imagem do Landsat 8 para a banda infravermelho próximo (B5).

Salar Uyuni				
$L_{\max} = 382,7613 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		$L_{\min} = -31,6085 \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		
$ND_{\max} = 65535,0000$		$ND_{\min} = 1,0000$		
$ND_{\text{pixel}} = 29588,0885$		$L_{(L_{\max}, L_{\min})} = \mathbf{155,4698} \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		
$Ad = -31,6148$		$Mult = 0,0063$		
$ND_{\text{pixel}} = 29588,0885$		$L_{(\text{ganho, offset})} = \mathbf{155,4706} \text{ (Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)}$		
Ang. Elev. Solar Landsat 8		60,9035 (°)		
Ang. Elev. Solar CBERS-4A		68,4402 (°)		
Fator do ângulo zenital solar (FZ _s)		0,93954		
Amostra	ND Landsat (B5)	Radiância (L) (Wsr ⁻¹ m ⁻²)	ND CBERS (B8)	Radiância (L) Landsat ajustada para o FZ _s
Am_1	29588,0885	155,4698	194,2500	165,4749
Am_2	26925,1656	138,6322	170,0000	147,5537
Am_3	29114,9608	152,4783	186,2500	162,2908
Am_4	27166,3079	140,1570	174,0000	149,1766
Am_5	29072,4435	152,2094	187,4646	162,0047
Am_6	26935,9577	138,7005	172,5000	147,6264
Am_7	31317,7532	166,4065	201,5000	177,1153
Am_8	30861,0216	163,5186	202,0000	174,0416
Am_9	30074,3135	158,5442	195,2500	168,7471
Am_10	30484,9728	161,1408	198,0000	171,5108
Am_11	30974,9927	164,2392	202,0000	174,8086
Am_12	31802,0000	169,4683	207,9160	180,3743
Am_13	27295,9533	140,9767	185,7500	150,0491
Am_14	26036,2500	133,0117	174,7000	141,5714
Am_15	11701,5000	42,3734	67,3636	45,10031
Am_16	30718,5000	162,6174	201,0625	173,0824
Am_17	30259,6666	159,7162	198,4583	169,9945
Am_18	12542,7500	47,6926	63,2222	50,7618
Am_19	28278,3333	147,1883	178,8571	156,6604
Am_20	27610,5000	142,9656	178,5555	152,1660
Am_21	21131,0153	101,9960	128,7500	108,5598
Am_22	30042,9933	158,3462	193,2500	168,5364
Am_23	30450,0140	160,9198	199,5000	171,2756
Am_24	30795,8590	163,1065	200,0000	173,6031

Fonte: O Autor (2024).

Os gráficos das retas de regressão obtidas entre os valores de Número Digital (ND) do sensor CBERS-4A e os valores de radiância (L) do sensor Landsat 8 para cada banda espectral estão apresentados nas Figuras 29 a 32. A Figura 29 exhibe os resultados para a banda azul (B2/B5), a Figura 30 para a banda verde (B3/B6), a Figura 31 para a banda vermelha (B4/B7) e a Figura 32 para a banda do infravermelho próximo (B5/B8).

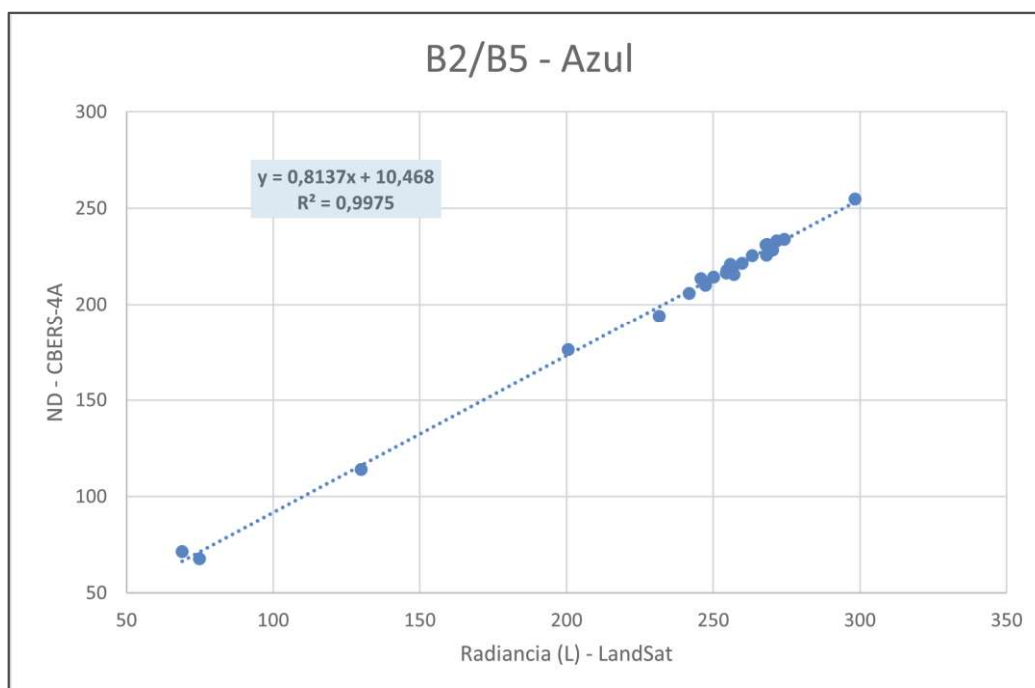


Figura 29: Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A para a banda azul (B2/B5).
 Fonte: O Autor (2024).

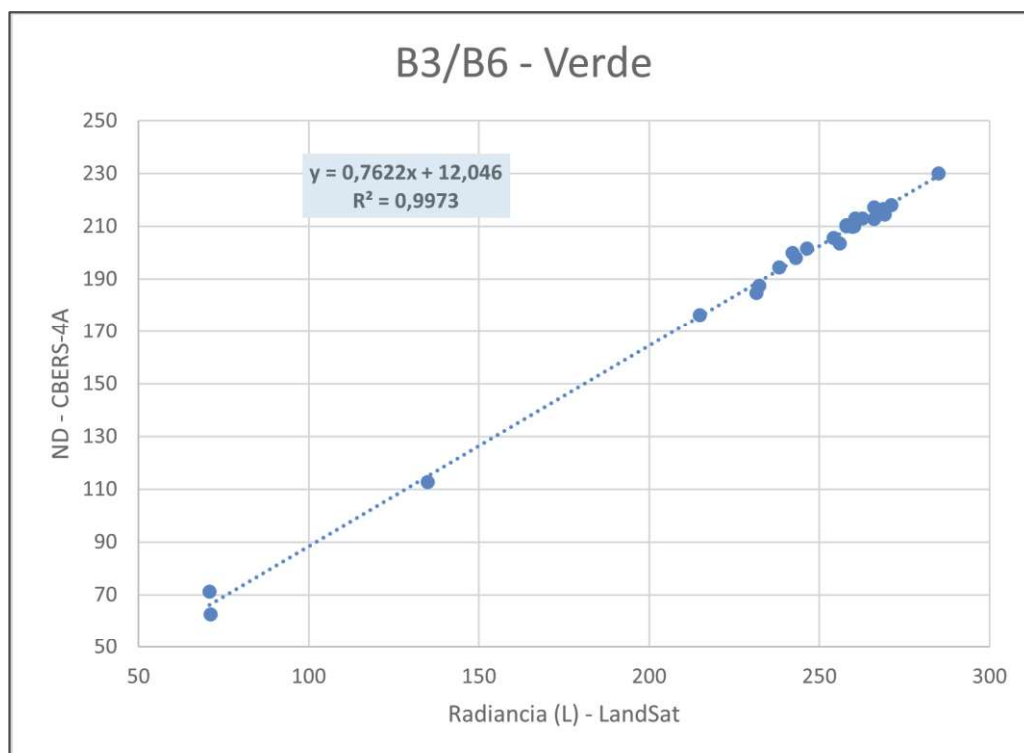


Figura 30: Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A para a banda verde (B3/B6).
 Fonte: O Autor (2024).

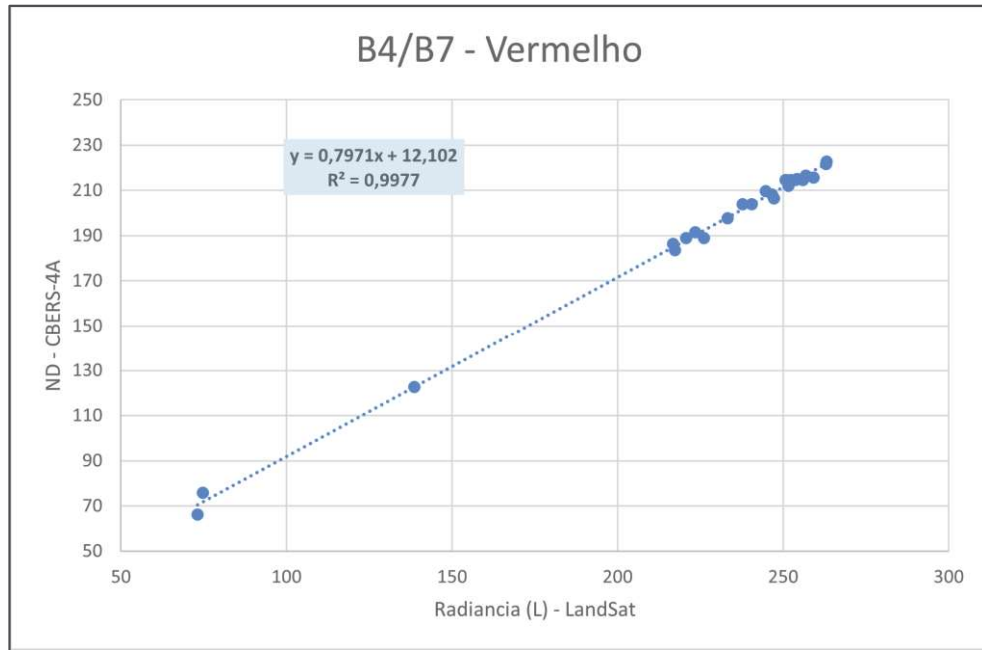


Figura 31: Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A, para a banda vermelho (B4/B7).
 Fonte: O Autor (2024).

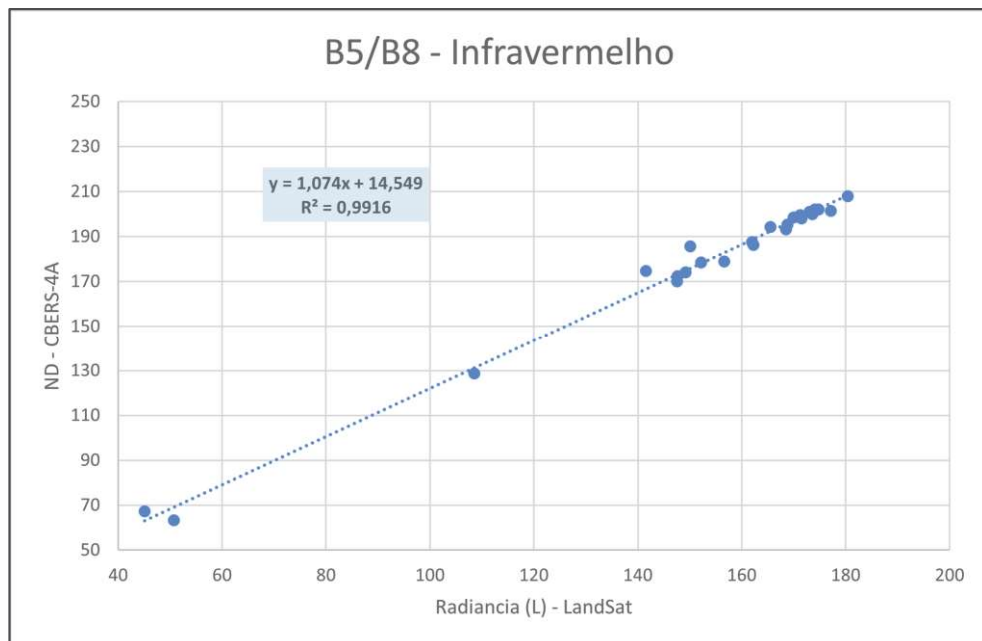


Figura 32: Gráfico da reta de regressão ajustada entre os dados das imagens do Landsat 8 e CBERS-4A, para a banda infravermelho próximo (B5/B8).
 Fonte: O Autor (2024).

Os gráficos apresentados nas Figuras 29 a 32 mostram que há uma correlação linear robusta entre os dados do Landsat 8 e do CBERS-4A na banda azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, o que é essencial para a calibração cruzada, como apresentado nos valores do coeficiente de determinação (R^2) que foi de aproximadamente 1 para todas as bandas. Os pontos alinhados na reta, mas com baixos valores de radiância e ND são associados a superfícies pouco refletivas. O número pequeno de amostras nessas condições ocorre porque

na data em que as imagens foram obtidas haviam poucas áreas escuras dentro dos limites do Salar de Uyuni e que estavam em ambas as imagens.

A análise de regressão é uma técnica estatística amplamente utilizada para analisar a relação entre variáveis e fazer previsões. E o coeficiente de determinação (R^2) indica o quão bem o modelo de regressão se ajusta aos dados. Em outras palavras, O R^2 é uma medida estatística importante para determinar a qualidade do ajuste do modelo aos dados (MONTGOMERY & RUNGER, 2019; FREDMANN et al., 2007; KUTNER et al., 2004).

Foram realizadas as análises dos pressupostos estatísticos (linearidade da relação entre as variáveis, o teste de normalidade, a homoscedasticidade (variância dos resíduos constante) e a independência dos erros para cada uma das bandas dos sensores dos satélites Landsat 8 e CBERS-4A) de uma regressão linear. Os mesmos serviram como bases fundamentais para garantir a validade, confiabilidade e precisão dos resultados obtidos pelo modelo. Essas suposições determinaram se as estimativas dos coeficientes, fornecidos pela regressão podem ser interpretados corretamente. Estes testes foram realizados no software R.

Realizada a análise de regressão linear, com os dados de radiância (L) do Landsat 8 (variável independente) e de NDs do CBERS-4A (variável dependente), e calculado os pressupostos estatísticos, os resultados obtidos para a banda azul estão apresentados na Figura 33 com o gráfico de resíduos *versus* valores ajustados (homoscedasticidade), na Figura 34 com o gráfico dos resíduos (normalidade) e os valores das análises estão contidos na Tabela 22.

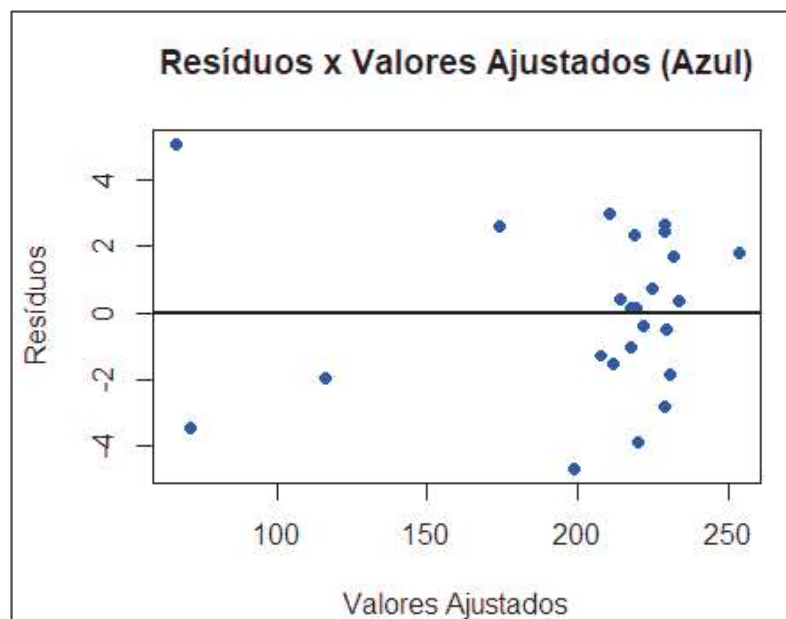


Figura 33: Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda azul.
Fonte: O Autor (2024).

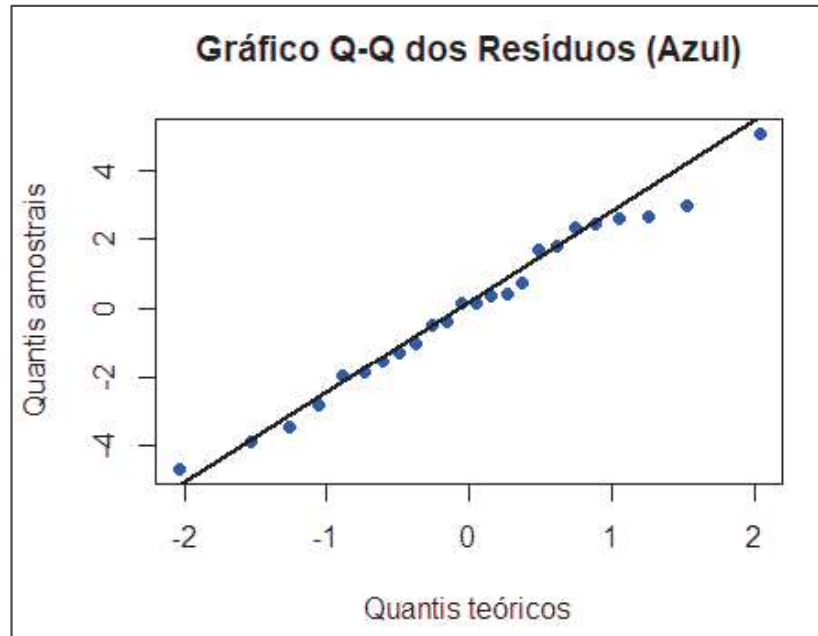


Figura 34: Gráfico Q-Q dos Resíduos (normalidade) para a banda azul.
Fonte: O Autor (2024).

Tabela 22: Pressupostos estatísticos para a banda azul (B5).

Banda Azul	
Equação da reta ajustada	$y = 0,8137x + 10,4680$
R^2	0,9975
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	
SW	0,9830
Valor-p	0,9436
Homoscedasticidade (Teste de <i>Breusch-Pagan</i>)	
BP	7,6253
Valor-p	0,0057
Independência dos Erros (Teste de <i>Durbin-Watson</i>)	
DW	1,7522

Fonte: O Autor (2024).

Ao analisar os resíduos do modelo de regressão linear ajustado para a banda azul conclui-se que o teste de *Shapiro-Wilk* (SW), utilizado para verificar a normalidade dos resíduos teve a estatística $SW = 0,9830$ e o valor $p = 0,9436$. Estes valores indicam que os resíduos seguem uma distribuição normal, pois o valor p foi maior que o valor ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Dessa forma, não houve evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula H_0 (resíduos seguem distribuição normal), atendendo ao pressuposto de normalidade necessário para a validade do modelo de regressão.

O teste de *Breusch-Pagan* (BP) foi aplicado para avaliar a homoscedasticidade dos resíduos, ou seja, se a variância dos erros é constante. O resultado apresentou uma estatística $BP = 7,6253$ e um valor $p = 0,0057$, que é menor que o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Isso levou à rejeição da hipótese nula H_0 , indicando a presença de heterocedasticidade nos resíduos.

O teste *Durbin-Watson* (DW) foi utilizado para verificar a independência dos resíduos. A estatística $DW = 1,7522$ indicou que não há evidências de autocorrelação entre os resíduos, pois o valor DW esteve próxima de 2, valor esperado em condições de independência. Assim,

o pressuposto de independência foi atendido, evidenciando que os resíduos não apresentam dependência. Por fim, coeficiente de determinação $R^2 = 0,9975$ apresentou um valor elevado, indicando um alto ajuste aos dados.

Os resultados obtidos do gráfico de resíduos *versus* valores ajustados e do gráfico Q-Q dos Resíduos para a banda verde, estão apresentados nas Figuras 35 e 36 e dos valores resultantes das análises na Tabelas 23, respectivamente.

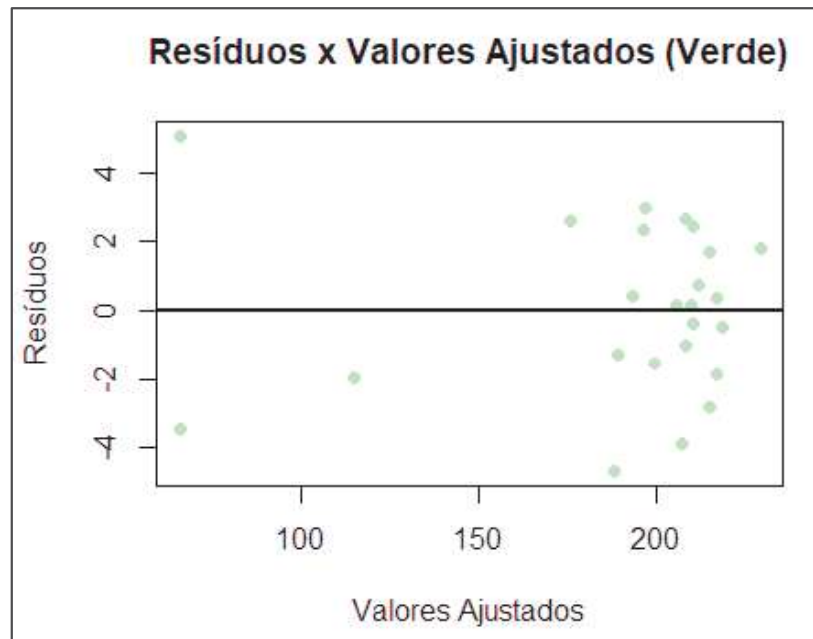


Figura 35: Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda verde.
Fonte: O Autor (2024).

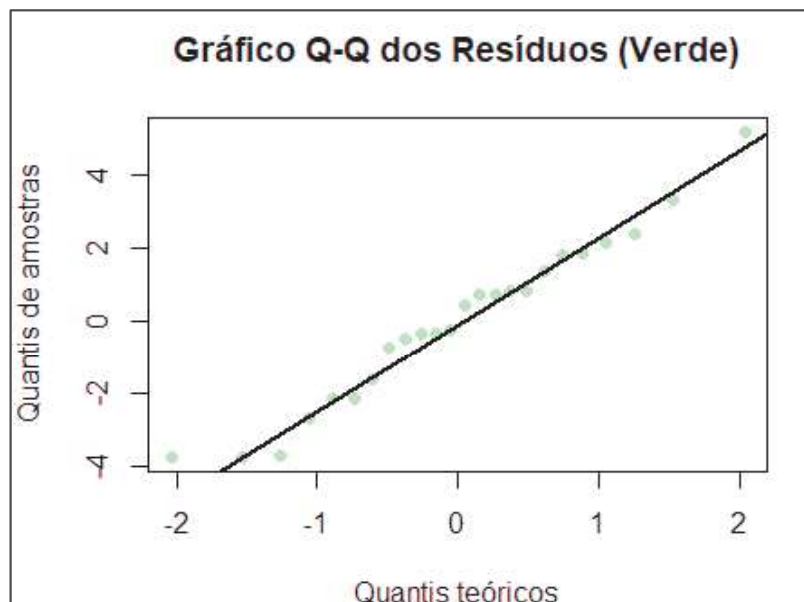


Figura 36: Gráfico Q-Q dos Resíduos (Normalidade) para a banda verde.
Fonte: O Autor (2024).

Tabela 23: Pressupostos estatísticos para a banda verde (B6).

Banda Verde	
Equação da reta ajustada	$y = 0,7622x + 12,0465$
R^2	0,9973
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	
W	0,9704
Valor-p	0,6762
Homoscedasticidade (Teste de <i>Breusch-Pagan</i>)	
BP	10,6560
Valor-p	0,0011
Independência dos Erros (Teste de <i>Durbin-Watson</i>)	
DW	1,5092

Fonte: O Autor (2024).

Ao analisar os resíduos do modelo de regressão linear ajustado para a banda verde conclui-se que o teste de *Shapiro-Wilk* (SW), utilizado para verificar a normalidade dos resíduos teve a estatística $SW = 0,9704$ e o valor $p = 0,6762$. Estes valores indicam que os resíduos seguem uma distribuição normal, pois o valor p foi maior que o valor ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Dessa forma, não houve evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula H_0 (resíduos seguem distribuição normal), atendendo ao pressuposto de normalidade necessário para a validade do modelo de regressão.

O teste de *Breusch-Pagan* (BP) foi aplicado para avaliar a homoscedasticidade dos resíduos, ou seja, se a variância dos erros é constante. O resultado apresentou uma estatística $BP = 10,6560$ e um valor $p = 0,0011$, que é menor que o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Isso levou à rejeição da hipótese nula H_0 , indicando a presença de heterocedasticidade nos resíduos.

O teste *Durbin-Watson* (DW) foi utilizado para verificar a independência dos resíduos. A estatística $DW = 1,5092$ indicou que há evidências de autocorrelação entre os resíduos, pois o valor DW esteve próxima de 2, valor esperado em condições de independência. Assim, o pressuposto de independência foi atendido, evidenciando que os resíduos não apresentam dependência. Por fim, o coeficiente de determinação $R^2 = 0,9973$ apresentou um valor elevado, indicando um alto ajuste aos dados.

Os resultados obtidos do gráfico de resíduos *versus* valores ajustados e do gráfico Q-Q dos Resíduos para a banda vermelho, estão apresentados nas Figuras 37 e 38 e dos valores resultantes das análises na Tabelas 24, respectivamente.

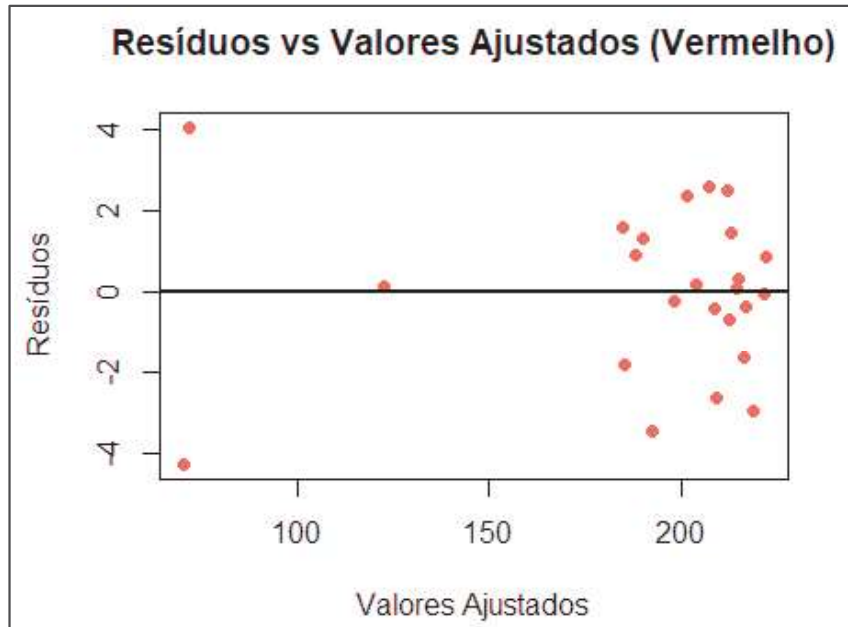


Figura 37: Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda vermelho.

Fonte: O Autor (2024).

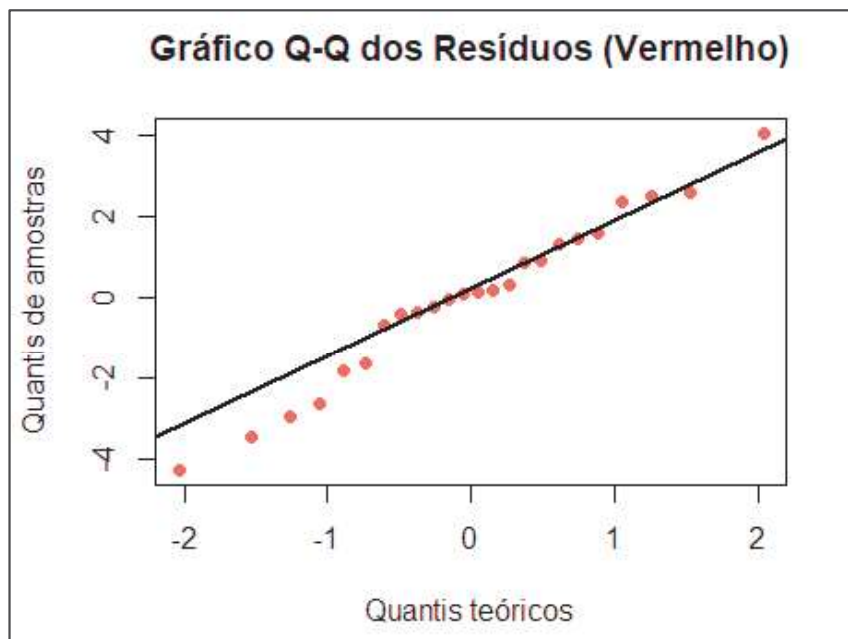


Figura 38: Gráfico Q-Q dos Resíduos (Normalidade) para a banda vermelho.

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 24: Pressupostos estatísticos para a banda vermelho (B7).

Banda Vermelho	
Equação da reta ajustada	$y = 0,7971x + 12,1016$
R^2	0,9977
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	
W	0,9778
Valor-p	0,8526
Homoscedasticidade (Teste de <i>Breusch-Pagan</i>)	
BP	10,6660
Valor-p	0,0011
Independência dos Erros (Teste de <i>Durbin-Watson</i>)	
DW	1,6086

Fonte: O Autor (2024).

Ao analisar os resíduos do modelo de regressão linear ajustado para a banda vermelha conclui-se que o teste de *Shapiro-Wilk* (SW), utilizado para verificar a normalidade dos resíduos teve a estatística $SW = 0,9778$ e o valor $p = 0,8526$. Estes valores indicam que os resíduos seguem distribuição normal, pois o valor p foi maior que o valor ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Dessa forma, não houve evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula H_0 (resíduos seguem distribuição normal), atendendo ao pressuposto de normalidade necessário para a validade do modelo de regressão.

O teste de *Breusch-Pagan* (BP) foi aplicado para avaliar a homoscedasticidade dos resíduos, ou seja, se a variância dos erros é constante. O resultado apresentou estatística $BP = 10,6660$ e um valor $p = 0,0011$, que é menor que o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Isso levou à rejeição da hipótese nula H_0 , indicando a presença de heterocedasticidade nos resíduos.

O teste *Durbin-Watson* (DW) foi utilizado para verificar a independência dos resíduos. A estatística $DW = 1,6086$ indicou que não há evidências de autocorrelação entre os resíduos o valor DW esteve próxima de 2, valor esperado em condições de independência. Assim, o pressuposto de independência foi atendido, evidenciando que os resíduos não apresentam dependência. Por fim, o coeficiente de determinação $R^2 = 0,9977$ apresentou um valor elevado, indicando um alto ajuste aos dados.

Os resultados obtidos do gráfico de resíduos *versus* valores ajustados e do gráfico Q-Q dos Resíduos para a banda infravermelho, estão apresentados nas Figuras 39 e 40 e dos valores resultantes das análises na Tabelas 25, respectivamente.

Cabe salientar que a heterocedasticidade apresentada nas bandas azul, verde e vermelha (a variância dos resíduos não é constante) pode estar relacionada a própria inerência dos dados que tem uma distribuição de dados ou muito claros ou muito escuros com alta ou baixa refletância. E para o processo de calibração é importante ter dados bem distribuídos em uma maior faixa de valores de radiância. E a correção da heterocedasticidade poderia incorrer em alteração da natureza dos dados e consequentemente no resultado da calibração.

Ao analisar os resíduos do modelo de regressão linear ajustado para a banda infravermelho conclui-se que o teste de *Shapiro-Wilk* (SW), utilizado para verificar a normalidade dos resíduos teve a estatística $SW = 0,8777$ e o valor $p = 0,0075$. Estes valores indicam que os resíduos não seguem uma distribuição normal, pois o valor p foi menor que o valor do nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Dessa forma a hipótese nula H_0 (resíduos seguem distribuição normal), foi rejeitada.

O teste de *Breusch-Pagan* (BP) foi aplicado para avaliar a homoscedasticidade dos resíduos, ou seja, se a variância dos erros é constante. O resultado apresentou uma estatística $BP = 2,1930$ e um valor $p = 0,1386$, que é maior que o valor ao nível de significância de 5% (α

= 0,05). Isso levou à aceitação da hipótese nula H_0 , indicando a presença de homoscedasticidade nos resíduos.

O teste *Durbin-Watson* (DW) foi utilizado para verificar a independência dos resíduos. A estatística $DW = 1,0240$ indicou que há evidências de autocorrelação entre os resíduos, o valor DW não esteve próxima de 2, valor esperado em condições de independência. Assim, o pressuposto de independência não foi atendido, evidenciando que os resíduos apresentam dependência. Por fim, o coeficiente de determinação $R^2 = 0,9916$ apresentou um valor elevado, indicando um alto ajuste aos dados.

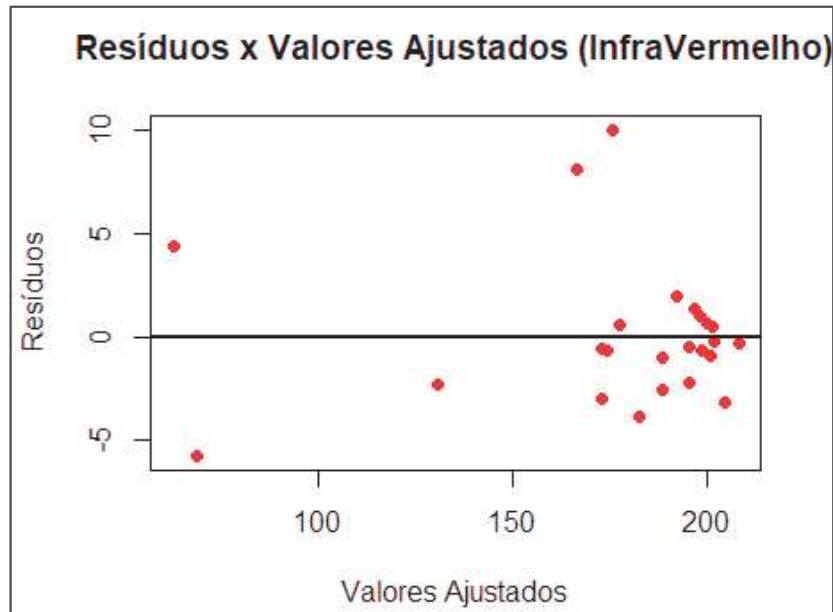


Figura 39: Gráfico de resíduos versus valores ajustados (homoscedasticidade) da banda infravermelho.

Fonte: O Autor (2024).

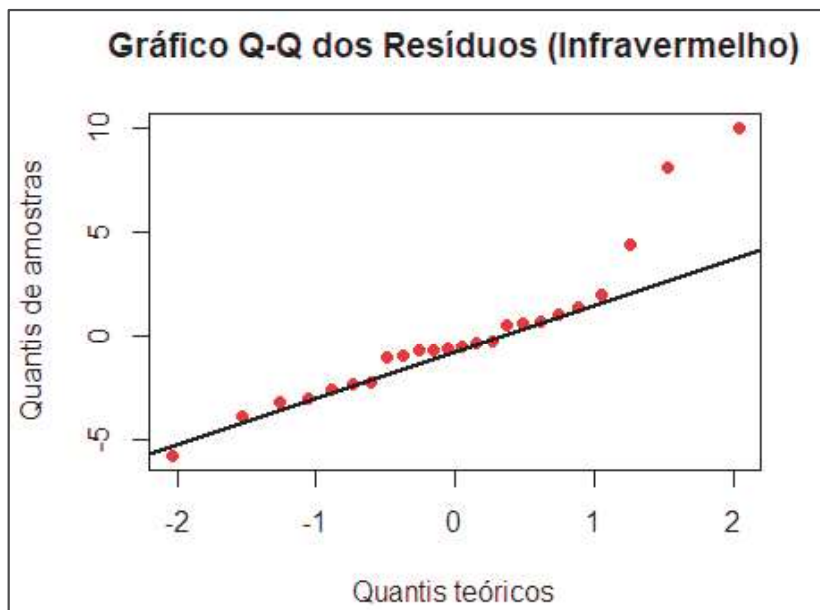


Figura 40: Gráfico Q-Q dos Resíduos (Normalidade) para a banda infravermelho.

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 25: Pressupostos estatísticos para a banda infravermelho-próximo (B8).

Banda infravermelho-próximo	
Equação da reta ajustada	$y = 1,0740x + 14,5489$
R^2	0,9916
Teste de <i>Shapiro-Wilk</i>	
SW	0,8777
Valor-p	0,0075
Homoscedasticidade (Teste de <i>Breusch-Pagan</i>)	
BP	2,1930
Valor-p	0,1386
Independência dos Erros (Teste de <i>Durbin-Watson</i>)	
DW	1,0240

Fonte: O Autor (2024).

Para os dados de calibração considera-se que a heterocedasticidade é inerente à natureza dos dados. Dados em que os resíduos aumentam à medida que os valores aumentam são de natureza heterocedástica (SCHMIDT, GERMANO, MILANI, 2019). Do mesmo modo, a não normalidade dos dados é esperada porque grande parte dos dados são de altos valores de radiância e ND, uma vez que na área de sobreposição das imagens do sensor OLI do Landsat 8 e sensor MUX do CBERS-4A não continha muitas áreas com baixos valores de radiância e ND. No entanto, mesmo sendo poucas as amostras de ND com valores baixos, estes dados são necessários para a correta determinação dos parâmetros de calibração.

Como os resultados dos gráficos obteve-se os valores dos coeficientes angular e linear da reta, que foram utilizados para calcular os parâmetros de calibração do sensor CBERS-4A, por meio das Equações 24 e 25, que são a radiância máxima e mínima, L_{\max} e L_{\min} para cada uma das bandas. Estes valores são necessários para a transformação dos valores dos NDs em radiância, com base na Equação 23. Deste modo o sensor MUX do satélite CBERS-4A passa a ter os dados necessários para a determinação da radiância e consequentemente para o cálculo da reflectância, como ocorre com Landsat 8, que fornece estas informações via arquivo de metadados.

Foram obtidos oito parâmetros de calibração para a imagem do CBERS-4, sendo dois parâmetros para cada banda, os quais agora incluem informações com características físicas relevantes, como a radiância (L), conforme apresentado na Tabela 26. Entretanto estas informações ainda são referentes a região do topo da atmosfera (do inglês *Top of Atmosphere - TOA*). Também, como alternativa para o cálculo de radiância, são colocados os valores de ganho e *offset* para o cálculo da radiância.

Tabela 26: Parâmetros de calibração do sensor MUX do satélite CBERS-4A.

Banda Azul (B5)			
L_{min}	12,8647	L_{max}	300,5186
Ganho	1,1280	Offset	12,8647
Banda Verde (B6)			
L_{min}	15,8042	L_{max}	318,75361
Ganho	1,1880	Offset	15,8042
Banda Vermelho (B7)			
L_{min}	15,1825	L_{max}	304,7271
Ganho	1,1354	Offset	15,1825
Banda Infravermelho Próximo (B8)			
L_{min}	13,5465	L_{max}	223,8836
Ganho	0,8248	Offset	13,5465

Fonte: O Autor (2024).

4.4 Correção Atmosférica aplicando o Modelo 6S

Após determinar os parâmetros de calibração, a etapa seguinte consistiu na aplicação do modelo físico de correção atmosférica 6S (VERMOTE et al., 1997; ANTUNES et al., 2012), para obtenção da imagem calibrada em reflectância ao nível da superfície. As características físicas de interesse, derivadas desse processo, bem como, as análises estatísticas descritivas, com valores máximos, mínimos média e desvio padrão, são detalhadas na Tabela 27.

Tabela 27: Reflectância das amostras de cada banda do CBERS-4A calibrado e suas respectivas análises estatísticas descritivas.

Ponto	Reflectância do CBERS-4A calibrado			
	B5	B6	B7	B8
2	0,0820	0,1350	0,1830	0,2970
3	0,0820	0,1390	0,1830	0,2740
6	0,0730	0,1390	0,1880	0,2740
7	0,0730	0,1390	0,1880	0,2740
8	0,0730	0,1350	0,1830	0,2640
11	0,0820	0,1480	0,1920	0,2740
12	0,0820	0,1440	0,1880	0,2690
13	0,0780	0,1390	0,1830	0,2690
15	0,0820	0,1440	0,1880	0,2740
16	0,0820	0,1440	0,1830	0,2690
17	0,0820	0,1440	0,1830	0,2690
18	0,0860	0,1390	0,1830	0,2640
21	0,0910	0,1350	0,1790	0,2640
22	0,0910	0,1390	0,1830	0,2640
23	0,0910	0,1440	0,1790	0,2640
24	0,0820	0,1350	0,1740	0,2640
Média	0,0820	0,1401	0,1837	0,2704
Mínimo	0,0730	0,1350	0,1740	0,2640
Máximo	0,0910	0,1480	0,1920	0,2970
Desvio Padrão	0,0057	0,0040	0,0042	0,0080

Fonte: O Autor (2024).

4.5 Dados do Espectrorradiômetro

As leituras radiométricas destinadas ao cálculo dos valores de reflectâncias foram realizadas entre 09:30h e 10:30h, no dia 13/05/2024, em dezesseis pontos (amostras) distintos no terreno, distanciados uniformemente entre si e localizados em campo com receptor GNSS RTK pelo método de locação. Os dados do levantamento com GNSS RTK serviram para a identificação das coordenadas dos pontos no terreno que posteriormente foram sobrepostos à imagem calibrada do sensor MUX do CBERS-4A.

Para cada um dos dezesseis (16) pontos do terreno foram realizadas as leituras do alvo (solo) e da placa de *Spectralon*, com o espectrorradiômetro, e estes dados foram processados no software *View Spec* obtendo a radiância conforme resultado demonstrado nos gráficos das Figuras 41 e 42 para o ponto 2.

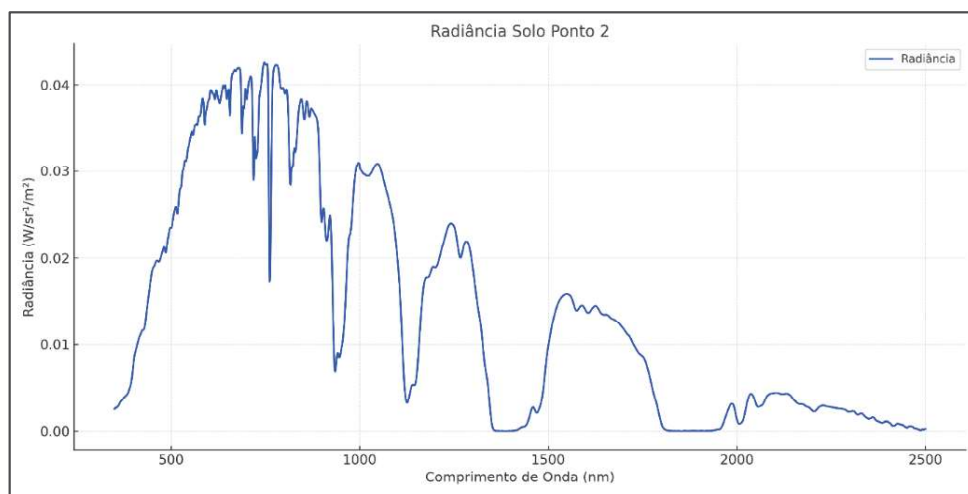


Figura 41: Gráfico da radiância do solo para o ponto 2.

Fonte: O Autor (2024).

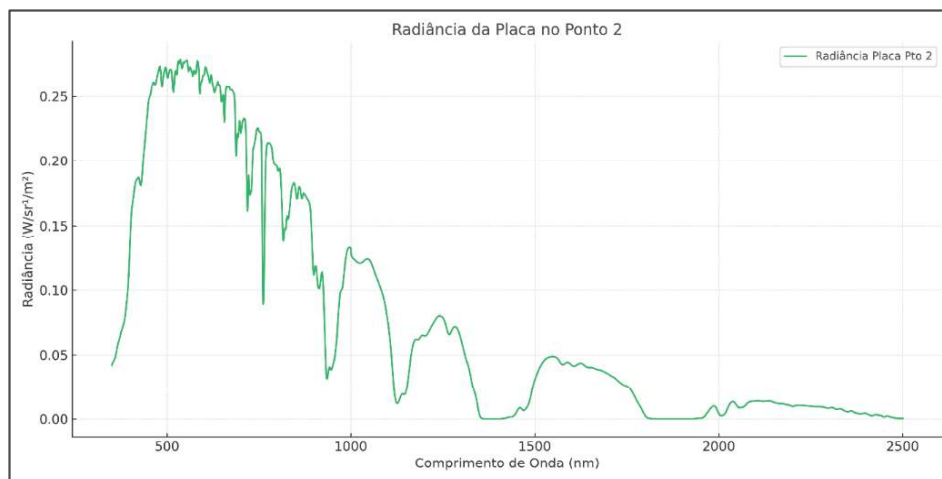


Figura 42: Gráfico da radiância da placa para o ponto 2.

Fonte: O Autor (2024).

Os valores da FRN foram fornecidos pelo INPE e seu gráfico é apresentado na Figura 43. Os valores das radiâncias dos pontos em FRN são apresentados na Tabela 28, para o exemplo do ponto 2, nos comprimentos de onda de 400 nm a 426 nm.

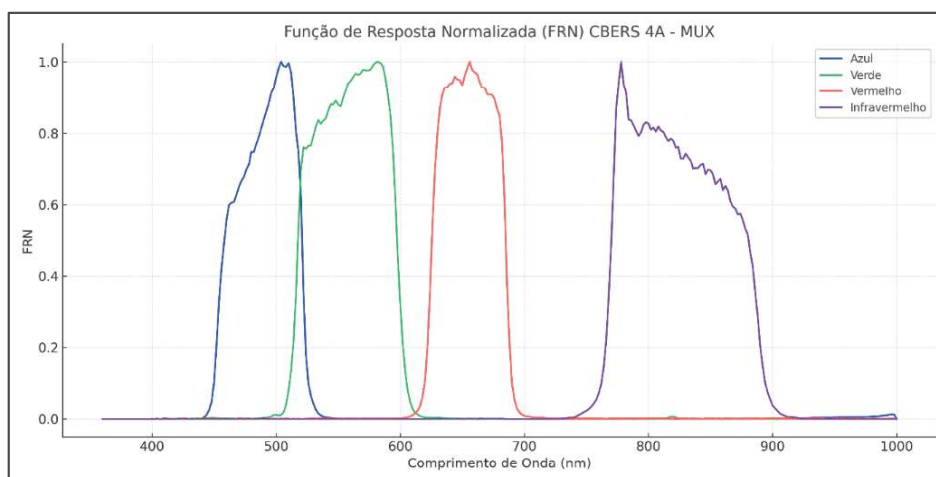


Figura 43: Gráfico de resposta normalizada para o CBERS-4A – MUX.
 Fonte: Adaptado INPE (2024).

Tabela 28: Exemplo de resultados das amostras coletadas em campo para o ponto 2 com o espectrorradiômetro do solo e placa de *Spectralon*.

Ponto 2 Comp. de onda (nm)	Radiância do Alvo Solo ($\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$)	Radiância da Placa Placa ($\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$)	Reflectância Placa
400	0,00701699	0,12556121	1,048987865
401	0,00739311	0,13208887	1,048760653
402	0,00771766	0,13785648	1,048422813
403	0,00799055	0,14266004	1,047970295
404	0,00823602	0,14613912	1,047392964
405	0,00839926	0,14862035	1,046891212
406	0,00853877	0,15060689	1,046361327
407	0,00869298	0,15248255	1,04576242
408	0,00882138	0,15435383	1,045250297
409	0,00896191	0,15632297	1,044888496
410	0,00913526	0,15847050	1,044517398
411	0,00933643	0,16073170	1,043991685
412	0,00948696	0,16260192	1,043510914
413	0,00964295	0,16431725	1,043115735
414	0,00980397	0,16581906	1,04273057
415	0,00993001	0,16687174	1,042235851
416	0,01002248	0,16764188	1,041843653
417	0,01012288	0,16825871	1,041483164
418	0,01024331	0,16872585	1,041083932
419	0,01034632	0,16886877	1,040625691
420	0,01044789	0,16915591	1,040182948
421	0,01055055	0,16959970	1,03983748
422	0,01065347	0,16999739	1,039594769
423	0,01076059	0,16998999	1,039246082
424	0,01083867	0,16946566	1,038853407
425	0,01087054	0,16840589	1,038431644
426	0,01086104	0,16694283	1,037979245

Fonte: O Autor (2024).

A próxima etapa consistiu em realizar o ajuste dos dados coletados em campo em função da resposta normalizada (FRN) para cada banda do sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A, conforme Equação 28. Os valores da FRN foram fornecidos pelo INPE e podem ser visualizados para o exemplo do ponto 2, dos comprimentos de onda de 400 nm a 426 nm, na Tabela 29. Já o resultado do ajuste, isto é, do produto da radiância pela FRN para o exemplo citado, pode ser visualizado na Tabela 30.

Tabela 29: Resultados dos valores da FRN do sensor MUX do CBERS-4A no ponto 2.

FRN - Ponto 2				
Comp. de onda (nm)	B5	B6	B7	B8
400	0,000000	0,000000	0,000445	0,000000
401	0,000000	0,000000	0,000222	0,000000
402	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
403	0,000088	0,000209	0,000320	0,000090
404	0,000177	0,000418	0,000639	0,000181
405	0,000088	0,000209	0,000320	0,000090
406	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
407	0,000000	0,000195	0,000000	0,000000
408	0,000000	0,000389	0,000000	0,000000
409	0,000595	0,000267	0,000000	0,000000
410	0,001190	0,000144	0,000000	0,000000
411	0,000595	0,000573	0,000380	0,000000
412	0,000000	0,001002	0,000761	0,000000
413	0,000072	0,000671	0,000380	0,000000
414	0,000143	0,000339	0,000000	0,000000
415	0,000140	0,000169	0,000146	0,000000
416	0,000136	0,000000	0,000291	0,000000
417	0,000068	0,000250	0,000146	0,000000
418	0,000000	0,000500	0,000000	0,000000
419	0,000132	0,000250	0,000042	0,000064
420	0,000265	0,000000	0,000084	0,000129
421	0,000132	0,000584	0,000262	0,000064
422	0,000000	0,001167	0,000440	0,000000
423	0,000122	0,000584	0,000220	0,000126
424	0,000244	0,000000	0,000000	0,000253
425	0,000239	0,000293	0,001105	0,000126
426	0,000234	0,000586	0,002210	0,000000

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 30: Exemplo do resultado dos valores da radiância nos alvos em função das FRN para cada banda do sensor MUX CBERS-4A no ponto 2.

Produto da Radiância do Alvo pela FRN – Ponto 2				
Comp. de onda (nm)	B5	B6	B7	B8
400	0,00000000	0,00000000	0,00000312	0,00000000
401	0,00000000	0,00000000	0,00000164	0,00000000
402	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
403	0,00000070	0,00000167	0,00000256	0,00000072
404	0,00000146	0,00000344	0,00000526	0,00000149
405	0,00000074	0,00000176	0,00000269	0,00000076
406	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
407	0,00000000	0,00000170	0,00000000	0,00000000
408	0,00000000	0,00000343	0,00000000	0,00000000
409	0,00000533	0,00000239	0,00000000	0,00000000
410	0,00001087	0,00000132	0,00000000	0,00000000
411	0,00000556	0,00000535	0,00000355	0,00000000
412	0,00000000	0,00000951	0,00000722	0,00000000
413	0,00000069	0,00000647	0,00000366	0,00000000
414	0,00000140	0,00000332	0,00000000	0,00000000
415	0,00000139	0,00000168	0,00000145	0,00000000
416	0,00000136	0,00000000	0,00000292	0,00000000
417	0,00000069	0,00000253	0,00000148	0,00000000
418	0,00000000	0,00000512	0,00000000	0,00000000
419	0,00000137	0,00000259	0,00000043	0,00000066
420	0,00000277	0,00000000	0,00000088	0,00000135
421	0,00000139	0,00000616	0,00000276	0,00000068
422	0,00000000	0,00001243	0,00000469	0,00000000
423	0,00000131	0,00000628	0,00000237	0,00000136
424	0,00000264	0,00000000	0,00000000	0,00000274
425	0,00000260	0,00000319	0,00001201	0,00000137
426	0,00000254	0,00000636	0,00002400	0,00000000

Fonte: O Autor (2024).

A Tabela 31 apresenta os resultados da radiância normalizada para a placa de *Spectralon* para o ponto 2. Salienta-se que este processo foi realizado, para todos os dezesseis pontos coletados em campo, bem como para todas as bandas do sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A.

Tabela 31: Valores da radiância da placa em função das FRN para cada banda do sensor MUX do CBERS-4A no ponto 2.

Radiância Normalizada da Placa para cada banda do CBERS-4A				
Comp. de onda (nm)	B5	B6	B7	B8
400	0,00000000	0,00000000	0,00005327	0,00000000
401	0,00000000	0,00000000	0,00002796	0,00000000
402	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
403	0,00001198	0,00002845	0,00004356	0,00001225
404	0,00002470	0,00005832	0,00008916	0,00002525
405	0,00001249	0,00002967	0,00004543	0,00001278
406	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
407	0,00000000	0,00002843	0,00000000	0,00000000
408	0,00000000	0,00005744	0,00000000	0,00000000
409	0,00008902	0,00003995	0,00000000	0,00000000
410	0,00018054	0,00002185	0,00000000	0,00000000
411	0,00009161	0,00008822	0,00005850	0,00000000
412	0,00000000	0,00015613	0,00011858	0,00000000
413	0,00001134	0,00010570	0,00005986	0,00000000
414	0,00002274	0,00005391	0,00000000	0,00000000
415	0,00002242	0,00002706	0,00002338	0,00000000
416	0,00002188	0,00000000	0,00004682	0,00000000
417	0,00001099	0,00004039	0,00002359	0,00000000
418	0,00000000	0,00008103	0,00000000	0,00000000
419	0,00002142	0,00004057	0,00000682	0,00001039
420	0,00004309	0,00000000	0,00001366	0,00002098
421	0,00002153	0,00009525	0,00004273	0,00001044
422	0,00000000	0,00019083	0,00007195	0,00000000
423	0,00001996	0,00009553	0,00003599	0,00002061
424	0,00003980	0,00000000	0,00000000	0,00004127
425	0,00003876	0,00004752	0,00017920	0,00002043
426	0,00003764	0,00009425	0,00035544	0,00000000

Fonte: O Autor (2024).

A Tabela 32 apresenta o resultado da reflectância normalizada e as análises estatísticas descritivas, com valores máximos, mínimos média e desvio padrão de todos os 16 pontos

Tabela 32: Resultados dos valores da reflectância normalizada dos alvos para cada banda do sensor MUX do CBERS-4A e suas respectivas análises estatísticas descritivas.

Ponto	Reflectância Normalizada do Alvo (solo) para as bandas do CBERS-4A			
	B5	B6	B7	B8
2	0,08764706	0,12654800	0,15908774	0,20517681
3	0,08562604	0,12360234	0,15984975	0,21674683
6	0,08418500	0,12749173	0,16344287	0,21273719
7	0,09732125	0,14887132	0,19521550	0,26122363
8	0,09581314	0,14076199	0,17421145	0,22384985
11	0,10001717	0,14521949	0,18889113	0,25638656
12	0,08192545	0,12189302	0,15640306	0,20740084
13	0,09357817	0,14126640	0,17884405	0,22974181
15	0,11165021	0,14901826	0,17969880	0,22749801
16	0,09925635	0,13619409	0,17230541	0,23339694
17	0,09918832	0,12939106	0,16159750	0,22194182
18	0,09401687	0,12527290	0,15927431	0,21769045
21	0,08662819	0,11393270	0,13916413	0,18545318
22	0,09065743	0,11828498	0,14266587	0,18527669
23	0,10451570	0,13896783	0,16713142	0,21121745
24	0,10087894	0,13333869	0,16217967	0,21035194
Média	0,0946	0,1325	0,1662	0,2191
Mínimo	0,0819	0,1139	0,1392	0,1853
Máximo	0,1117	0,1490	0,1952	0,2612
Desvio Padrão	0,0079	0,0105	0,0145	0,0200

Fonte: O Autor (2024).

Comparando a Tabela 27 com a Tabela 32 verifica-se que os valores de reflectância do CBERS-4A, corrigidos pelo modelo 6S, mostram-se próximos dos dados de reflectância coletados em campo por meio do espectrorradiômetro nos dezesseis pontos analisados, com destaque para as bandas B5 (azul) e B6 (verde). A consistência relativa observada entre os dois conjuntos de dados confirma a eficácia do modelo de calibração aplicado ao CBERS-4A, garantindo uma representação precisa das condições de superfície a partir dos dados orbitais. As discrepâncias entre os dados do espectrorradiômetro e da imagem calibrada do CBERS-4A, bem como suas respectivas análises estatísticas descritivas podem ser visualizadas na Tabela 33, com valores máximos, mínimos média e desvio padrão.

Tabela 33: Diferenças dos valores de reflectância entre o espectrorradiômetro e a imagem do sensor MUX do CBERS-4A calibrada e suas respectivas análises estatísticas descritivas.

Ponto	Diferenças de reflectância do espectrorradiômetro e CBERS-4A calibrada			
	B5	B6	B7	B8
2	0,0056	-0,0085	-0,0239	-0,0918
3	0,0036	-0,0154	-0,0232	-0,0573
6	0,0112	-0,0115	-0,0246	-0,0613
7	0,0243	0,0099	0,0072	-0,0128
8	0,0228	0,0058	-0,0088	-0,0402
11	0,0180	-0,0028	-0,0031	-0,0176
12	-0,0001	-0,0221	-0,0316	-0,0616
13	0,0156	0,0023	-0,0042	-0,0393
15	0,0297	0,0050	-0,0083	-0,0465
16	0,0173	-0,0078	-0,0107	-0,0356
17	0,0172	-0,0146	-0,0214	-0,0471
18	0,0080	-0,0137	-0,0237	-0,0463
21	-0,0044	-0,0211	-0,0398	-0,0785
22	-0,0003	-0,0207	-0,0403	-0,0787
23	0,0135	-0,0050	-0,0119	-0,0528
24	0,0189	-0,0017	-0,0118	-0,0536
Média	0,0946	0,1325	0,1662	0,2191
Mínimo	0,0819	0,1139	0,1392	0,1853
Máximo	0,1117	0,1490	0,1952	0,2612
Desvio Padrão	0,0079	0,0105	0,0145	0,0200

Fonte: O Autor (2024).

4.6 Análise da Significância Estatística das Diferenças entre a Imagem CBERS-4A e os Dados do Espectrorradiômetro

Foi realizado uma análise comparativa entre os valores de reflectância extraídos da imagem do satélite CBERS 4A calibrada, e os valores coletados em campo com o espectrorradiômetro. Para avaliar se as diferenças observadas entre esses dois conjuntos de dados são estatisticamente significativas, foi aplicado o teste t pareado de *Student* ao nível de significância de 5% para as quatro bandas espectrais: azul, verde, vermelho e infravermelho próximo.

Os resultados indicaram que para a banda azul, a estatística t foi 5,15, com um valor de $p = 0,00012$, para a banda verde a estatística t foi -3,01 com um valor de $p = 0,0087$, para a banda vermelha a estatística t foi -5,26 com um valor de $p = 0,000096$ e para a banda infravermelho próximo a estatística t foi -9,80 com um valor de $p = 6,5 \times 10^{-10}$ indicando uma diferença estatisticamente significativa entre os dois conjuntos de dados para todas as quatro bandas.

A média as diferenças em percentagem entre todas as bandas foram de 1,94%, sendo na faixa espectro do visível (1,26%, 0,76%, 1,75) e na faixa do infravermelho próximo (3,98%). No entanto, estas diferenças foram inferiores às encontradas nos trabalhos publicados por outros autores como as calibrações nos sensores MUX e WFI a bordo do satélite CBERS-4, realizada por Pinto et al. (2016), que indicou discrepâncias da ordem de 2% a 5% para as

diferentes bandas espectrais, com maior variação nas bandas do infravermelho próximo. Esse comportamento é semelhante ao observado no CBERS-4A.

Esses resultados demonstram uma menor discrepância nas bandas do visível e uma maior discrepância para a banda espectral do infravermelho próximo, o que pode estar relacionado a desafios na calibração do sensor do CBERS-4A para comprimentos de onda mais longos.

Estas diferenças podem estar relacionadas as incertezas no processo de correção atmosférica uma vez que esta é realizada por modelo de transferência radiativa cujos parâmetros podem não representar acuradamente a situação do momento de tomada das imagens, além das imperfeições do modelo.

Na Figura 44 são apresentados os resultados da comparação da diferença média por banda entre os pontos de validação na imagem calibrada do sensor MUX do CBERS-4A e o espectrorradiômetro.

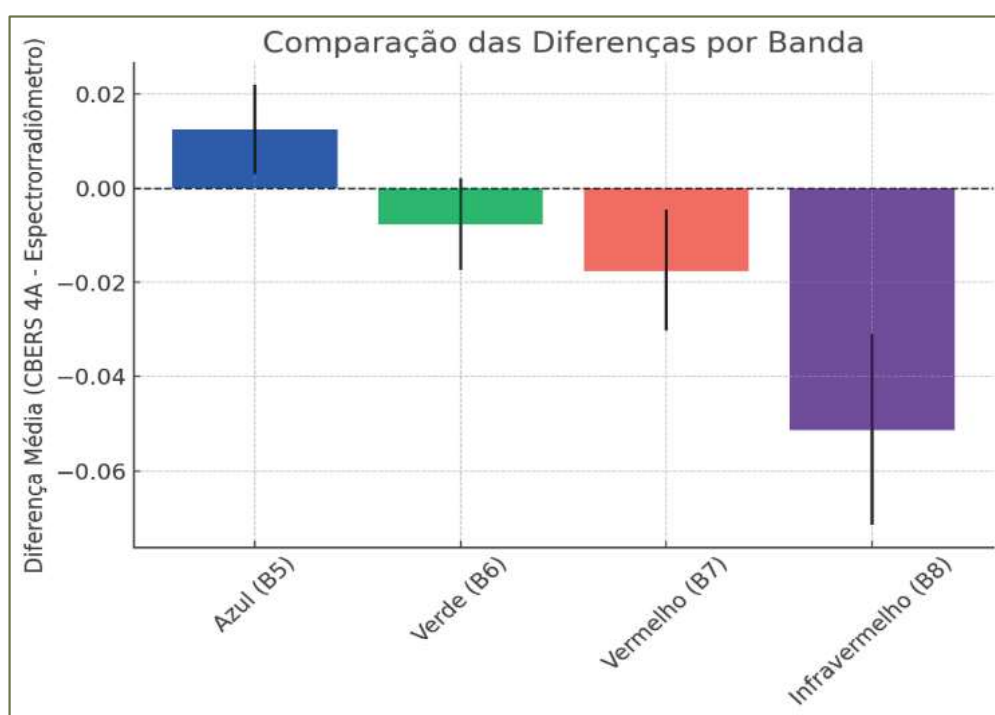


Figura 44: Comparação da diferença média por banda entre os pontos de validação na imagem calibrada do sensor MUX do CBERS-4A e o espectrorradiômetro.

Fonte: Adaptado INPE (2024).

4.7 Análise Comparativa dos Valores de Reflectância entre o Espectrorradiômetro, CBERS-4A Calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A

A análise comparativa das reflectâncias a nível de superfície entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrado, sensor OLI do satélite Landsat 8 e do sensor MSI do Sentinel 2A, tiveram como objetivo realizar uma verificação adicional dos dados obtidos para os mesmos dezesseis pontos no dia anterior (12/05/2024) à passagem do CBERS-4A (13/05/2024) e do dia em que foi realizado o levantamento de campo com o espectrorradiômetro, que teve condições atmosféricas semelhantes, onde os resultados dos dois últimos sensores citados podem ser visualizados na Tabela 34.

Tabela 34: Reflectância a nível de superfície do satélite Landsat 8 e Sentinel 2A para as bandas do visível e do infravermelho próximo (IVP).

Ponto	Reflectância a nível de superfície do satélite Landsat 8				Reflectância a nível de superfície do satélite Sentinel 2A			
	B2	B3	B4	B5	B5	B6	B7	B8
2	0,1510	0,1742	0,1914	0,2463	0,1780	0,2198	0,2550	0,3019
3	0,1449	0,1652	0,1805	0,2384	0,1741	0,2222	0,2600	0,3044
6	0,1481	0,1714	0,1864	0,2244	0,1762	0,2200	0,2636	0,3197
7	0,1481	0,1714	0,1864	0,2244	0,1748	0,2216	0,2606	0,3006
8	0,1511	0,1749	0,1921	0,2323	0,1731	0,2170	0,2494	0,2953
11	0,1491	0,1724	0,1885	0,2233	0,1764	0,2242	0,2598	0,3023
12	0,1491	0,1724	0,1885	0,2233	0,1812	0,2278	0,2666	0,3066
13	0,1485	0,1732	0,1901	0,2320	0,1786	0,2278	0,2670	0,3199
15	0,1502	0,1716	0,1866	0,2244	0,1854	0,2236	0,2568	0,3084
16	0,1502	0,1716	0,1866	0,2244	0,1872	0,2254	0,2592	0,3035
17	0,1505	0,1716	0,1865	0,2242	0,1889	0,2252	0,2592	0,3083
18	0,1505	0,1716	0,1865	0,2242	0,1854	0,2172	0,2482	0,2986
21	0,1512	0,1713	0,1870	0,2246	0,1844	0,2198	0,2438	0,2926
22	0,1508	0,1698	0,1833	0,2234	0,1876	0,2210	0,2544	0,3028
23	0,1508	0,1698	0,1833	0,2234	0,1883	0,2262	0,2552	0,3007
24	0,1506	0,1695	0,1831	0,2221	0,1890	0,2208	0,2506	0,2970

Fonte: O Autor (2024).

Analisando os resultados das reflectâncias a nível de superfície obtidos pelos sensores a bordo dos satélites o Landsat 8 e do Sentinel 2 percebe-se que os valores do CBERS-4A calibrados e corrigidos para os efeitos atmosféricos (Tabela 27) estão mais próximos dos dados coletados com o espectrorradiômetro do que os valores de reflectância da superfície obtidos pelos sensores OLI Landsat 8 e MSI do Sentinel 2A. Esse fato pode estar ocorrendo devido a diferenças dos modelos de correção atmosférica aplicada para cada satélite, bem como as calibrações que foram aplicadas nestes dois sensores. Adicionalmente, parte das diferenças podem ser devido a diferenças da função de resposta normalizadas das bandas, uma vez que os dados de reflectância do solo obtidos pelo espectrorradiômetro foram ajustados para a função de resposta normalizada das bandas do sensor MUX do CBERS-4A.

Para uma melhor visualização e entendimento dessas diferenças foram gerados gráficos que são apresentados nas Figuras 45 a 48, para as bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, respectivamente, demonstrando os valores de reflectância dos dezesseis pontos obtidos com o espectrorradiômetro. Esses pontos foram utilizados como referência para a validação da pesquisa em comparação aos dados calibrados da imagem CBERS-4A e das reflectâncias provenientes das imagens do Landsat 8 e Sentinel 2A para os mesmos pontos no qual contatou-se a proximidade dos valores do CBERS-4A calibrado com os dados do espectrorradiômetro para as bandas do visível.

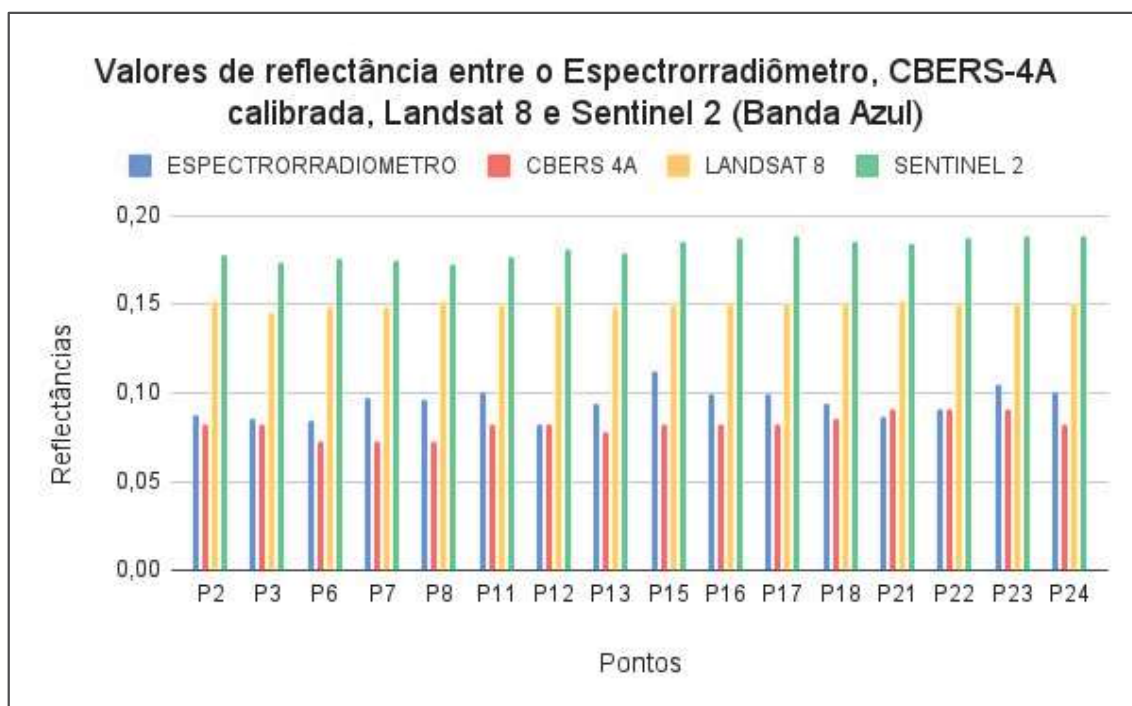


Figura 45: Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda azul).
 Fonte: O Autor (2024).

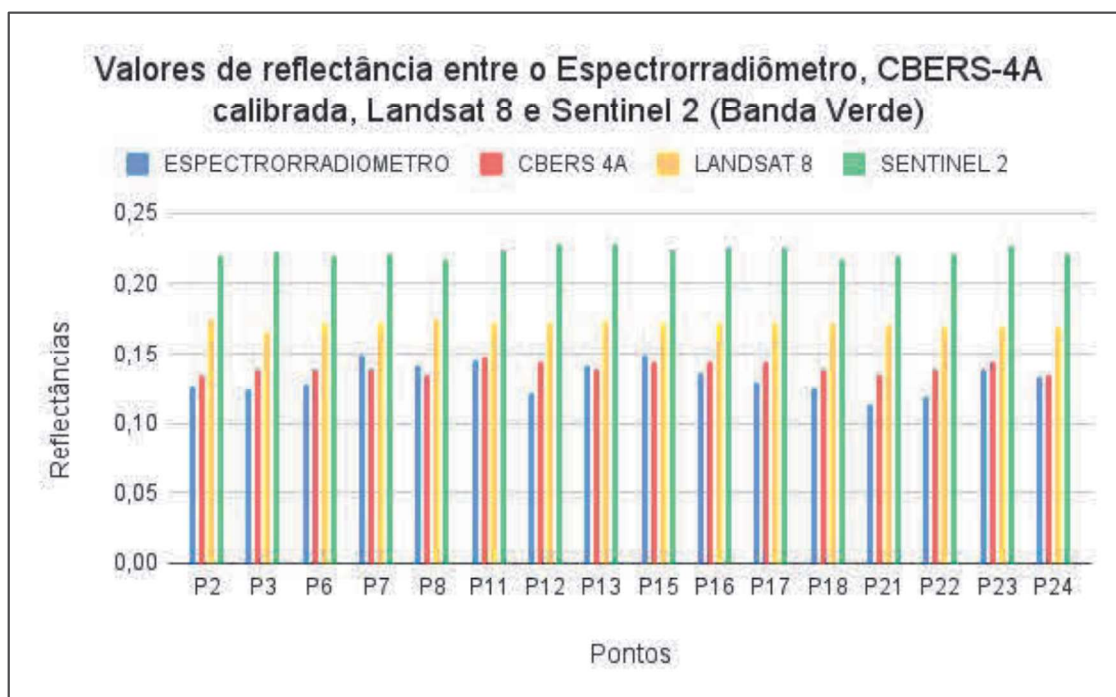


Figura 46: Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda verde).
 Fonte: O Autor (2024).

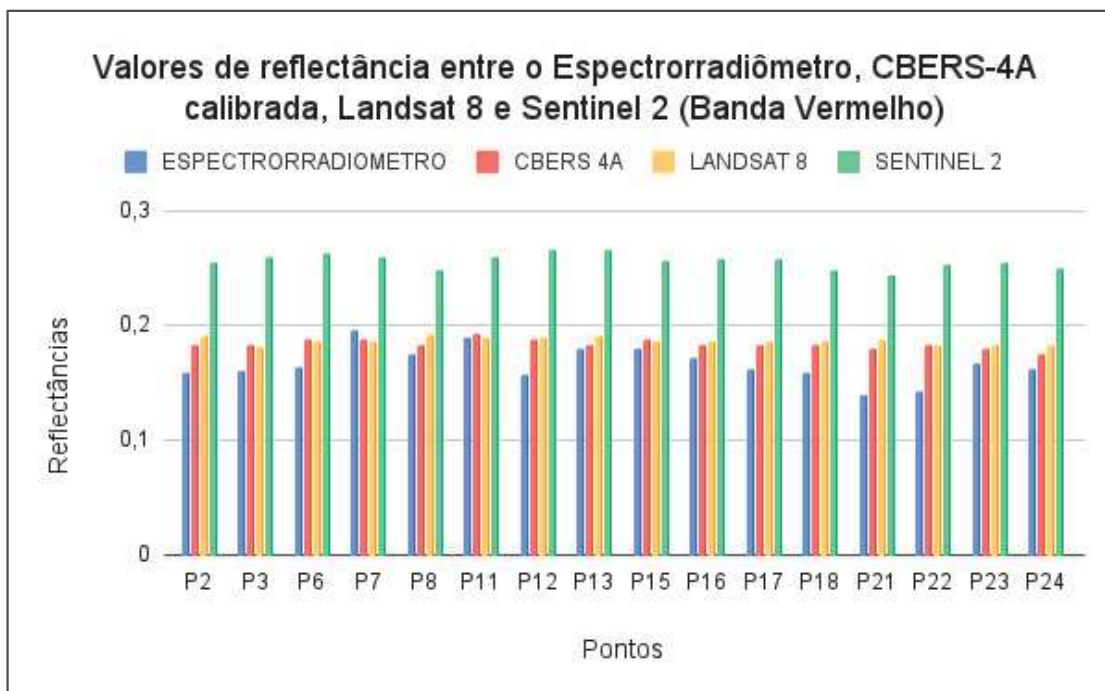


Figura 47: Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda vermelho).
 Fonte: O Autor (2024).

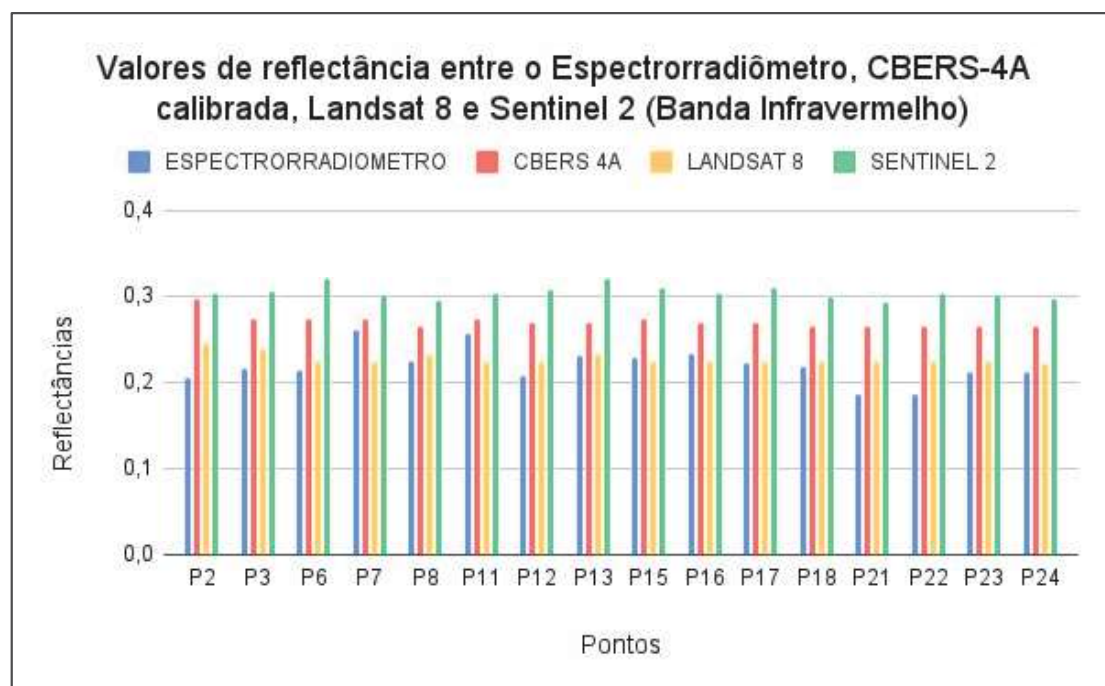


Figura 48: Valores de reflectância entre o espectrorradiômetro, CBERS-4A calibrada, Landsat 8 e Sentinel 2A (banda infravermelho).
 Fonte: O Autor (2024).

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil e a China têm um programa espacial conjunto de longo prazo o Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil (CBERS). O último satélite deste programa (CBERS-4A) foi lançado em 20 de dezembro de 2019. A extração de informações quantitativas fidedignas de dados coletados por sensores a bordo do CBERS-4A só é possível se o sensor estiver calibrado.

A metodologia proposta nesta tese consistiu na calibração cruzada do sensor MUX a bordo do satélite CBERS-4A em relação ao sensor OLI do Landsat 8, este último por sua vez, utilizado como referência, visto que seus metadados são disponibilizados pela agência, com todas informações de sua calibração necessárias para a referida pesquisa. Uma vez calibrados, a imagem do CBERS-4A foi corrigida para os efeitos atmosféricos utilizando o modelo físico de correção atmosférica 6S, para validar a precisão com medições de campo, obtidas com o espectrorradiômetro modelo FieldSpec® 4 *Standard Resolution*.

De acordo com Ponzoni et al. (2015) a calibração consiste em ajustar e validar as medições obtidas pelos sensores a bordo dos satélites, comparando-as com valores conhecidos ou padrões, para garantir que os dados adquiridos representem com precisão as condições reais da superfície terrestre. Esse processo envolve a determinação de coeficientes de calibração que convertem os números digitais das imagens em grandezas físicas, como radiância ou reflectância espectral.

Considerando as diferentes elevações solares no momento da aquisição das imagens pelos satélites Landsat 8 e CBERS-4A, ainda que pequenas, o Fator de ajuste do ângulo Zenital Solar (FZ_S) foi calculado para ajustar variações de radiância causadas pela iluminação. Esse ajuste garantiu que as comparações entre as radiâncias fossem realizadas em condições similares.

Para se obter os coeficientes de calibração foram realizados os ajustes das regressões lineares entre as radiâncias do Landsat 8 (variável independente) e os valores de ND do CBERS-4A (variável dependente) para as bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo. Os coeficientes de determinação (R^2) para todas as bandas foram próximos de 1,0, indicando uma forte correlação linear entre os sensores. Os testes estatísticos aplicados (*Shapiro-Wilk*, *Breusch-Pagan* e *Durbin-Watson*) confirmaram a validade da regressão, apesar da presença de heterocedasticidade nas bandas visíveis, explicada pela variabilidade das superfícies. No entanto, a heterocedasticidade foi considerada como inerente à natureza dos dados, por apresentarem resíduos que aumentam à medida que os valores de radiância e ND aumentam.

Para a validação dos resultados da calibração, foram obtidas leituras com espectrorradiômetro dos pontos em campo, calculadas as reflectâncias e padronizadas com a FRN para as bandas do MUX CBERS-4A, que foram comparadas com as reflectâncias da imagem do CBERS-4A calibrado e corrigidas para o efeito atmosférico.

As diferenças médias percentuais entre os valores de reflectância da imagem calibrada do CBERS-4A e as medições in situ foram de 1,94%. Para as bandas do espectro visível, as discrepâncias foram menores (1,26%, 0,76% e 1,75%), enquanto na banda do infravermelho próximo a diferença foi maior (3,98%). Esses resultados indicam uma melhor correspondência entre os dados no intervalo do visível e uma maior discrepância na faixa do infravermelho próximo, possivelmente associada a desafios na calibração do sensor do CBERS-4A para comprimentos de onda mais longos.

As diferenças observadas neste estudo foram menores do que as reportadas em trabalhos anteriores, como a calibração dos sensores MUX e WFI a bordo do satélite CBERS-4, realizada

por Pinto et al. (2016), onde as discrepâncias variaram entre 2% e 5% para as diferentes bandas espectrais, com maior variação nas faixas do infravermelho próximo. Esse comportamento é consistente com os resultados obtidos para o CBERS-4A, sugerindo desafios semelhantes na calibração radiométrica desses sensores, especialmente em comprimentos de onda mais longos.

Essas discrepâncias podem estar relacionadas a incertezas inerentes ao processo de correção atmosférica, que é realizado por meio de modelos de transferência radiativa. A acurácia desses modelos depende da correta parametrização das condições atmosféricas no momento da aquisição das imagens, sendo que desvios nesses parâmetros, bem como limitações intrínsecas ao modelo, podem introduzir erros adicionais na estimativa da reflectância de superfície.

Os coeficientes de calibração radiométrica utilizados para sensores do programa Landsat, conforme documentado por Chander et al. (2008), destacam a importância da atualização contínua desses parâmetros para manter a acurácia dos produtos de reflectância de superfície. Esse aspecto também se aplica ao CBERS-4A, indicando a necessidade de avaliações periódicas e refinamentos nos modelos de calibração cruzada utilizados.

Adicionalmente, realizou-se uma análise comparativa entre as reflectâncias de superfície do CBERS-4A, com as obtidas do OLI Landsat 8 e do MSI Sentinel-2A. Essa análise revelou que discrepâncias menores em relação à reflectância de campo foram para o CBERS-4A, confirmando a eficácia da calibração cruzada. As diferenças entre Landsat 8 e Sentinel-2 podem ser atribuídas a diferentes métodos de correção atmosférica e também a diferenças de calibração dos sensores.

Dessa forma, conclui-se que os resultados desta metodologia proposta da calibração cruzada utilizando a correção atmosférica do modelo 6S com validação em campo obtidos neste estudo, corroboram as tendências identificadas na literatura evidenciando que a calibração do CBERS-4A apresenta desempenho compatível com outros sensores ópticos. Mas que desafios persistem para comprimentos de onda do infravermelho próximo. O estudo destaca a importância de correções atmosféricas robustas e validações com dados de campo para garantir a acurácia dos sensores orbitais.

Como considerações finais, destaca-se que as dificuldades encontradas durante a execução da pesquisa permearam-se principalmente devido as condições atmosféricas adversas onde foram cancelados alguns dias de campo até encontrar situação ideal, com céu limpo e com a passagem do CBERS-4A pela área de estudo concomitante com o trabalho de campo com o espectrorradiômetro, para validação da calibração cruzada dos resultados.

Recomenda-se que a pesquisa seja continuada em estudos futuros a serem realizados sobre o tema, com a aplicação da metodologia proposta para a calibração cruzada analisando em passagem concomitante dos três satélites CBERS-4A, Landsat 8/9 e Sentinel 2 sobre a área de estudo, com o cálculo das incertezas dos dados. Para a questão de terem poucas amostras de baixos valores de radiância nas imagens, recomenda-se avaliar o uso combinado de amostras de imagens de duas épocas distintas, uma de época seca e outra de época em que a área alagada dentro do Salar de Uyuni é maior.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, M. A. H.; FREIRE, R. M. B.; BOTELHO, A. da S.; TONIOLLI, L. H. Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S (p. 6). Congresso Brasileiro de Cartografia, 21. Anais [...]. Belo Horizonte: CBC, 2003.
- ANTUNES, M. A. H.; TAVARES JÚNIOR, J. B. Calibração do sensor CCD-CBERS II com dados do ASTER. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. Anais [...]. Goiânia: INPE, 2005. p. 775-781.
- ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; COSTA, A. R. da; GLERIANI, J. M. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS ALOS/AVNIR-2 UTILIZANDO O MODELO 6S. Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia, v. 64, n. 4, p. 531-539, 29 jul. 2012. DOI: 10.14393/rbcv64n5-44818.
- ATZBERGER, C. Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. Remote Sensing, v. 5, n. 2, p. 949–981, 22 fev. 2013. DOI: 10.3390/rs5020949.
- ATZBERGER, C.; VUOLO, F.; KLISCH, A.; REMBOLD, F.; MERONI, M.; MELLO, M. P.; FORMAGGIO, A. Agriculture. In: Prasad S. Thenkabail. (Org.). Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing. 1ª edição. Boca Raton, Flórida, USA: CRC Press, v. 2, p. 71-112, 2015. DOI [10.1201/b19322](https://doi.org/10.1201/b19322).
- BARBA, G. B. Elaboración de una base de datos de áreas pseudoinvariantes (api) en Europa mediante imágenes multitemporales MODIS para la mejora de procesos de corrección radiométrica. 2019. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agronomos, Universidad Pública de Navarra, Navarra, 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2454/35112>. Acesso em: 01 maio 2024.
- BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações. 1ª edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 161p. 2019.
- BEN-DOR, E.; KINDEL, B. GOETZ, A. F. H. Quality assessment of several methods to recover surface reflectance using synthetic imaging spectroscopy data. Remote Sensing of Environment 90. p. 389-404, 2004.
- BERK, A.; CONFORTI, P.; HAWES, F.; PERKINS, T.; GUIANG, C.; ACHARYA, P.; KENNETT, R.; GREGOR, B.; VAN DEN BOSCH, J. Next Generation MODTRAN for improved atmospheric correction of spectral imagery. Burlington: Spectral Sciences, Inc. AFRL-RV-PS-TR-2016-0105, 64p, 2016.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; BALBINOT, R.; DENARDI, L.; GAIDA, W.; TELES, T. S.; TRAUTENMULLER, J. W.; VENDRUSCOLO, R. Avaliação do efeito combinado do ângulo zenital solar e da perda de folhas sobre imagens MODIS/ e MISR/TERRA. In: XI Seminário de Atualização de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas

Aplicados à Engenharia Florestal, 2014, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: IEP, 2014. v. 1. p. 186-193.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2023/06/projeto-cbers-6-deve-inspirar-novas-cooperacoes-entre-brasil-e-china>. Acesso em: novembro de 2023.

BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA*, v. 107, n. 26, p. 12052-12057, 15 jun. 2010.

CARNEIRO, A. de S. R.; JESUS, T. B. de; SANTOS, E. P. dos; SANTOS, R. L. Use of Spectroradiometry in the Characterization of Organic Matter Content in the Soil. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (Gesta)*, Salvador, v. 7, n. 1, p. 86-95, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/28086>.

CHANDER, G.; MEYER, D. J.; HELDER, D. L. Cross Calibration of the Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI sensor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 42, n. 12, p. 2821–2831, 2004.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L. E HELDER, D. L. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no 5, p. 893–903, maio de 2009.

CHANDER, G.; HEWISON, T.J.; FOX, N.; WU, X.; XIONG, X.; BLACKWELL, W. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.51, n.3, p. 1056-1080, 2013a.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479, 1988.

COLWELL, R. N. Uses and Limitations of Multispectral Remote Sensing. In: *Proceedings of the Fourth Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor: Institute of Science and Technology, University of Michigan, p. 71-100, 1966.

COLWELL, R. N. *Manual of remote sensing*. American Society of Photogrammetry, 1983.

COOLEY, T.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G. W.; HOKE, M. L.; RATKOWSKI, A. J.; CHETWYND, J. H.; GARDNER, J. A.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW M. W.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ACHARYA, P.K.; MILLERD, D.; LEWIS, P. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Toronto, ON, Canada, p. 1414-1418, vol.3, 2002.

COPERNICUS PROGRAMME. Sentinel-2 Mission. Disponível em: <https://www.copernicus.eu/en>. Acesso em: fevereiro de 2025.

DINGUIRARD, M.; SLATER, P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. *Remote Sensing of Environment*, v. 68, n. 3, p. 194-205, 1999.

DIRZO, R.; RAVEN, P. H. Global state of biodiversity and loss. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 28, p. 137-167, 2003.

EMBRAPA TERRITORIAL. Satélites de Monitoramento. Campinas, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento>. Acesso em: outubro de 2023.

ESCORIHUELA, M. J.; ESCORIHUELA, A.; RICHAUME, P.; KERR, Y. H.; SMOS calibration and validation over the Salar de Uyuni, 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012, pp. 1124-1126. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351351>.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sharing Earth Observation Resources (EOPortal). Landsat-8 Overview. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-8>. Acesso em: outubro de 2023.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel-2 Overview. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2. Acesso em: fevereiro de 2025.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel online. User Guides Introduction. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. Acesso em: fevereiro de 2025.

FISCHER, W.A; HEMPHILL; W.R, KOVER, A. Progress in Remote Sensing (1972–1976) Photogrammetria, vol. 32, no 2, outubro de 1976, p. 33–72. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/0031-8663\(76\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0031-8663(76)90013-2).

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDI, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D. & ZAKS, D. P. M.. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, p. 337–342, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10452>.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. Sensoriamento Remoto em agricultura. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 284 p.

FREEDMAN, D.; PISANI, R.; PURVES, R. Statistics. New York: W.W. Norton & Company, 2007.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Correção Atmosférica em Sensoriamento Remoto: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Pernambuco, v. 13, n. 1, p. 229-248, 01 mar. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/>.

GAO, B.; MONTES, M. J.; DAVIS, C. O.; GOETZ, A. F. H. Atmospheric Correction Algorithms for Hyperspectral Remote Sensing Data of Land and Ocean. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, setembro de 2009, p. S17–24.

HELDER, D. L.; BASNET, B.; MORSTAD, D. L. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 5, pp. 527–539, 2010. <https://doi.org/10.5589/m10-085>.

HILKER, T. 2018. Surface reflectance/bidirectional reflectance distribution function. In: Liang, S. (Ed.). *Comprehensive remote sensing* 3, 2-8.

HU, C.; MULLER-KARGER, F. E.; ANDREFOUET, S.; CARDER, K. L. Atmospheric correction and cross-calibration of LANDSAT-7/ETM+ imagery over aquatic environments: A multiplatform approach using Sea WiFS/MODIS. *Remote Sensing of Environment*, v. 78, p. 99 – 107, 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS). Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/>. Acesso em: novembro de 2023.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. 2. ed. São José dos Campos, Sp: Parênteses, 2009. 598 p. Tradução de José Carlos Neves Epiphany et al.

KUTNER, M. H.; NETER, J. *Applied Linear Regression Models*. [s.l.] Irwin/McGraw-Hill, 2004.

LAMPARELLI, R. A. C.; PONZONI, F. J.; ZULLO JR.; J.; PELLEGRINO, G. Q.; ARNAUD, Y. Characterization of the Salar de Uyuni for in Orbit Satellite Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, n. 6, p.1461-1468, 2003. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.810713>.

LATORRE, M.; CARVALHO JR.; O. A. de; CARVALHO, A. P. F. de SHIMABUKURO, Y. E. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA: CONCEITOS E FUNDAMENTOS. *Revista Espaço e Geografia*, Brasília, v. 5, n. 1, p. 153-178, 14 mar. 2002. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegeografia>.

LINTZ, J. SIMONETT, D. S., organizadores. *Remote sensing of environment*. Addison-Wesley Pub. Co., Advanced Book Program, 1976, 714 p.

LORENZZETTI, J. A. *Princípios físicos de sensoriamento remoto*. São Paulo: Blucher, 2015. 293 p.

MATTHEW, M. W.; ADLER-GOLDEN, S. M.; BERK, A.; FELDE, G.; ANDERSON, G. P.; GORODETZKY, D.; SHIPPET, M. Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data. In: *Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 2002. Proceedings [...], p. 157-163.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (org.). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: UnB, 2012. 276 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332292728_INTRODUCAO_AO_PROCESSAMENTO_DE_IMAGENS_DE_SENSORIAMENTO_REMOTO. Acesso em: 01 maio 2024.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. Fundamentos de Espectrorradiometria. In: MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, 2019a. Cap. 1. p. 12-37.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. (org.). Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 297 p.

MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. International Journal of Remote Sensing, v. 8, n. 12, p. 1807-1827, 1987.

MOBLEY, C. D. Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press, 1994.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for engineers. Hoboken, Nj: Wiley, 2019.

MORAES NOVO, E. M. L. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 2a. Edição. São Paulo: Blucher, 2002.

MORAN, M.S.; JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; TEILLET, P. M. Evaluation of Simplified Procedures for Retrieval of Land Surface Reflectance Factors from Satellite Sensor Output, Remote Sensing of Environment, v. 41, n. 1-2, p. 169-184, Aug.-Sep. 1992.

N2YO. Disponível em: <https://www.n2yo.com>. Acessado em: setembro de 2023.

NASA. Landsat 8 (L8) - Data Users Handbook. Nov. 2019. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/data/handbooks-guides/>. Acesso em: novembro de 2023.

NASA. Landsat Science. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>. Acesso em: novembro de 2023a.

NOCITA, M.; STEVENS, A.; WESEMAEL, B. V.; AITKENHEAD, M.; BACHMANN, M.; BARTHÈS, B.; DOR, E. B.; BROWN, D. J.; CLAIROTTE, M.; CSORBA, A.; DARDENNE, P.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENOT, V.; GUERRERO, C.; KNADEL, M.; MONTANARELLA, L.; NOON, C.; RAMIREZ-LOPEZ, L.; ROBERTSON, J.; SAKAI, H.; WETTERLIND, J. Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. Advances in Agronomy, v. 132, p. 139-159, 2015.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4ª. Edição. Edgard Blücher Ltda., 2010. 388p.

OLIVEIRA, L. G. L. de; PONZONI, F. J.; MORAES, E. C. CONVERSÃO DE DADOS RADIOMÉTRICOS ORBITAIS POR DIFERENTES METODOLOGIAS DE

CARACTERIZAÇÃO ATMOSFÉRICA. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 121-133, 28 jan. 2009. Disponível em: <https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf>.

PINTO, C. T. Avaliação das incertezas na caracterização de superfícies de referência para calibração absoluta de sensores eletroópticos. 2011. 167 p. (sid.inpe.br/mtcm19/2011/03.30.18.09-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39E3LH2>. Acesso em: 01 maio 2024.

PINTO, C. T.; PONZONI, F. J.; CASTRO, R. M. de. Calibração Cruzada de Sensores de Observação da Terra: relatório de pesquisa em calibração radiométrica de sensores eletro-ópticos. São José dos Campos: INPE, 2013. 32 p. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EL22DE>. Acesso em: 01 maio 2024.

PONZONI, F. J.; LAMPARELLI, R. A. C.; PELLEGRINO, G. Q.; ZULLO JR.; J. Evaluation of the “Salar De Uyuni/Bolivia” as radiometric calibration test site for satellite sensors. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, v. XXXIII, n. 1, p. 231-238, 2000. Disponível em: https://www.isprs.org/proceedings/xxxiii/congress/part1/231_XXXIII-part1.pdf. Acesso em: 01 maio 2024.

PONZONI, F. J.; ZULLO JR., J.; LAMPARELLI, R. A. C. In-flight absolute calibration of the CBERS-2 IRMSS sensor data. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 4, p. 799-804, 2006.

PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R. A. C. In-flight absolute calibration of the CBERS-2 CCD sensor data. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 80, n. 2, p. 373-380, 2008. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtcm17@80/2008/06.03.18.31>. Acesso em: 02 abr. 2013.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos/SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2010.

PONZONI, F. J.; PINTO, C. T.; LAMPARELLI, R. A. C.; ZULLO JR., J.; ANTUNES, M. A. H. A. Calibração de Sensores Orbitais. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 96 p.

PONZONI, F. J.; ZULLO, J.; LAMPARELLI, R. A. C.; PELLEGRINO, G. Q.; ARNAUD, Y. In-flight absolute calibration of the Landsat-5 TM on the test site Salar de Uyuni, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 12, pp. 2761-2766, 2004. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.836386>.

PRICE, J. C. Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook. Remote Sensing of Environment, v. 22, p. 3-9, 1987.

RICHTER, R.; SCHLÄPFER, D. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery. DLR report DLR-IB 565-02/15. Wessling: Deutsches zentrum für Luft-und Raumfahrt. 252, 2015.

RUMORA, L.; MILER, M.; MEDAK, D. Impact of Various Atmospheric Corrections on Sentinel-2 Land Cover Classification Accuracy Using Machine Learning Classifiers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 277, 2020.

SANTOS, T. C. C dos; ANTUNES, M. A. H.; SEOANE, J. C. S.; de SOUSA, G. M. COMPARAÇÃO DE MODELOS DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA PARA IMAGEM WORLDVIEW-2. *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 69, n. 2, p. 229-240, 07 dez. 2017. DOI: 10.14393/rbcv69n2-44013.

SCHMIDT, D.; GERMANO, A. M. C.; MILANI, T. L. Subjective sensitivity data: Considerations to treat heteroscedasticity, *Cogent Medicine*, Vol. 6(1), 2019. <https://doi.org/10.1080/2331205X.2019.1673086>.

SCHOTT, J. R. Remote sensing: the image chain approach. 2. ed. New York, NY: Oxford University, 2007. 666305169.

SCHOWENGERDT, R. A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing 2a. Edição. Elsevier, 2012.

SLATER, P. N. Remote sensing, optics and optical systems. Addison-Wesley Pub. Co, 1980.

SLATER, P. N.; BIGGAR S. F.; PALMER, J. M.; THOME, K. J. Unified approach to absolute radiometric calibration in the solar-reflective range. *Remote Sensing of Environment*, 77, p. 293– 303, 2001.

SOARES, F. S. Dinâmica de um ambiente estuarino a partir de dados espectrais, o estudo de caso sinótico da Baía de Guanabara, em um período seco. 2017. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <http://app.uff.br/riuff/handle/1/26182>. Acesso em: 01 maio 2024.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C. Tutorial 2 - Radiometria Espectral. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. Tutorial. Curitiba: Inpe, 1993. v. 1, p. 1-26. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.18.16.17/doc/INPE-7605.pdf>. Acesso em: 01 maio 2024.

TEILLET, P. M.; BARKER, J. L.; MARKHAM, B. L.; IRISH, R. R.; FEDOSEJEVS, G.; STOREY, J. C. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. *Remote Sensing of Environment*, v.78, n.1-2, p.39-54, 2001.

TEILLET, P.M.; MARKHAM, B.L.; IRISH, R. R. Landsat cross-calibration based on near simultaneous imaging of common ground targets. *Remote Sensing of Environment*, v.102, n.3-4, p.264-270, 2006.

THE ROYAL SOCIETY. Reaping the benefits: Science and the sustainable intensification of global agriculture. Disponível em:<<http://royalsociety.org/Reapingthebenefits>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

THOME, K. J. Absolute radiometric calibration of Landsat-7 ETM+ using the reflectancebased method. *Remote Sensing of Environment*, v. 78, n. 1-2, p.27-38, 2001.

THOME, K. J.; BIGGAR, S. F.; WISNIEWSKI, W. Cross Comparison of EO-1 Sensors and Other Earth Resources Sensors to Landsat-7 ETM+ Using Railroad Valley Playa. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, v.41, n.6, p. 1180-1188, 2003.

USGS. U.S. Geological Survey. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: out. 2023.

VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35, n. 3, p. 675–686, maio 1997.

VITO. Vlaams Instituut voor Technologisch Onderzoek. 2017. iCOR plugin for SNAP toolbox: software user manual. Version 1. Mol: VITO Remote Sensing Unit.

WEISS, C. V. da C.; CAMARGO, D. C. S.; ROSCA, E. H.; ESPINOZA, J. Análise comparativa entre métodos de correção atmosférica em imagens do sensor Operational Land Imager (OLI), plataforma Landsat 8C. *Scientia Plena*. v.11, n.2, p. 1-8, (2014).

WELTER, A.; STATELLA, T.; LIMA, G. M. de. Distorções causadas pela falta de calibração radiométrica e efeitos atmosféricos na análise de dados de sensoriamento remoto orbital. *Geografia*, v. 45, n. 2, p. 361–383, 7 dez. 2020.

YOO, H.; YU, F.; WU, X. Site selection and characterization at Uyuni desert for the calibration and validation of GOES-16 ABI solar reflective bands, *SPIE Optical Engineering + Applications*, 2017, San Diego, California, United States, Proceedings, Volume 10402, Earth Observing Systems XXII; 104022M, 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2275427>.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. Processamento de imagens de satélite. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p.

7 ANEXO

METADADOS LANDSAT 8

```
GROUP = LANDSAT_METADATA_FILE
GROUP = PRODUCT_CONTENTS
  ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
  DIGITAL_OBJECT_IDENTIFIER = "https://doi.org/10.5066/P975CC9B"
  LANDSAT_PRODUCT_ID = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1"
  PROCESSING_LEVEL = "L1TP"
  COLLECTION_NUMBER = 02
  COLLECTION_CATEGORY = "T1"
  OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
  FILE_NAME_BAND_1 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B1.TIF"
  FILE_NAME_BAND_2 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B2.TIF"
  FILE_NAME_BAND_3 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B3.TIF"
  FILE_NAME_BAND_4 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B4.TIF"
  FILE_NAME_BAND_5 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B5.TIF"
  FILE_NAME_BAND_6 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B6.TIF"
  FILE_NAME_BAND_7 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B7.TIF"
  FILE_NAME_BAND_8 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B8.TIF"
  FILE_NAME_BAND_9 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B9.TIF"
  FILE_NAME_BAND_10 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B10.TIF"
  FILE_NAME_BAND_11 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B11.TIF"
  FILE_NAME_QUALITY_L1_PIXEL =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_QA_PIXEL.TIF"
  FILE_NAME_QUALITY_L1_RADIOMETRIC SATURATION =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_QA_RADSAT.TIF"
  FILE_NAME_ANGLE_COEFFICIENT =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_ANG.txt"
  FILE_NAME_ANGLE_SENSOR_AZIMUTH_BAND_4 =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_VAA.TIF"
  FILE_NAME_ANGLE_SENSOR_ZENITH_BAND_4 =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_VZA.TIF"
  FILE_NAME_ANGLE_SOLAR_AZIMUTH_BAND_4 =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_SAA.TIF"
  FILE_NAME_ANGLE_SOLAR_ZENITH_BAND_4 =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_SZA.TIF"
  FILE_NAME_METADATA_ODL =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_MTL.txt"
  FILE_NAME_METADATA_XML =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_MTL.xml"
  DATA_TYPE_BAND_1 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_2 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_3 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_4 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_5 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_6 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_7 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_8 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_9 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_10 = "UINT16"
  DATA_TYPE_BAND_11 = "UINT16"
  DATA_TYPE_QUALITY_L1_PIXEL = "UINT16"
```

DATA_TYPE_QUALITY_L1_RADIOMETRIC_SATURATION = "UINT16"
 DATA_TYPE_ANGLE_SENSOR_AZIMUTH_BAND_4 = "INT16"
 DATA_TYPE_ANGLE_SENSOR_ZENITH_BAND_4 = "INT16"
 DATA_TYPE_ANGLE_SOLAR_AZIMUTH_BAND_4 = "INT16"
 DATA_TYPE_ANGLE_SOLAR_ZENITH_BAND_4 = "INT16"
 END_GROUP = PRODUCT_CONTENTS
 GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
 SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_8"
 SENSOR_ID = "OLI_TIRS"
 WRS_TYPE = 2
 WRS_PATH = 233
 WRS_ROW = 74
 NADIR_OFFNADIR = "NADIR"
 TARGET_WRS_PATH = 233
 TARGET_WRS_ROW = 74
 DATE_ACQUIRED = 2024-01-05
 SCENE_CENTER_TIME = "14:30:09.3720220Z"
 STATION_ID = "LGN"
 CLOUD_COVER = 9.34
 CLOUD_COVER_LAND = 9.34
 IMAGE_QUALITY_OLI = 9
 IMAGE_QUALITY_TIRS = 9
 SATURATION_BAND_1 = "Y"
 SATURATION_BAND_2 = "N"
 SATURATION_BAND_3 = "N"
 SATURATION_BAND_4 = "N"
 SATURATION_BAND_5 = "Y"
 SATURATION_BAND_6 = "Y"
 SATURATION_BAND_7 = "Y"
 SATURATION_BAND_8 = "N"
 SATURATION_BAND_9 = "N"
 ROLL_ANGLE = -0.001
 SUN_AZIMUTH = 100.42165239
 SUN_ELEVATION = 60.90352411
 EARTH_SUN_DISTANCE = 0.9833242
 TRUNCATION_OLI = "UPPER"
 TIRS_SSM_MODEL = "FINAL"
 TIRS_SSM_POSITION_STATUS = "ESTIMATED"
 END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
 GROUP = PROJECTION_ATTRIBUTES
 MAP_PROJECTION = "UTM"
 DATUM = "WGS84"
 ELLIPSOID = "WGS84"
 UTM_ZONE = 19
 GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00
 GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
 GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
 PANCHROMATIC_LINES = 15601
 PANCHROMATIC_SAMPLES = 15421
 REFLECTIVE_LINES = 7801
 REFLECTIVE_SAMPLES = 7711
 THERMAL_LINES = 7801
 THERMAL_SAMPLES = 7711
 ORIENTATION = "NORTH_UP"

CORNER_UL_LAT_PRODUCT = -19.18177
 CORNER_UL_LON_PRODUCT = -68.55391
 CORNER_UR_LAT_PRODUCT = -19.16325
 CORNER_UR_LON_PRODUCT = -66.35492
 CORNER_LL_LAT_PRODUCT = -21.29623
 CORNER_LL_LON_PRODUCT = -68.54783
 CORNER_LR_LAT_PRODUCT = -21.27549
 CORNER_LR_LON_PRODUCT = -66.31894
 CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 546900.000
 CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = -2121000.000
 CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 778200.000
 CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = -2121000.000
 CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 546900.000
 CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = -2355000.000
 CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 778200.000
 CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = -2355000.000
 END_GROUP = PROJECTION_ATTRIBUTES
 GROUP = LEVEL1_PROCESSING_RECORD
 ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
 DIGITAL_OBJECT_IDENTIFIER = "https://doi.org/10.5066/P975CC9B"
 REQUEST_ID = "1838490_03617"
 LANDSAT_SCENE_ID = "LC82330742024005LGN00"
 LANDSAT_PRODUCT_ID = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1"
 PROCESSING_LEVEL = "L1TP"
 COLLECTION_CATEGORY = "T1"
 OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
 DATE_PRODUCT_GENERATED = 2024-01-13T05:56:33Z
 PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_16.3.1"
 FILE_NAME_BAND_1 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B1.TIF"
 FILE_NAME_BAND_2 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B2.TIF"
 FILE_NAME_BAND_3 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B3.TIF"
 FILE_NAME_BAND_4 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B4.TIF"
 FILE_NAME_BAND_5 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B5.TIF"
 FILE_NAME_BAND_6 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B6.TIF"
 FILE_NAME_BAND_7 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B7.TIF"
 FILE_NAME_BAND_8 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B8.TIF"
 FILE_NAME_BAND_9 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B9.TIF"
 FILE_NAME_BAND_10 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B10.TIF"
 FILE_NAME_BAND_11 = "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_B11.TIF"
 FILE_NAME_QUALITY_L1_PIXEL = "
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_QA_PIXEL.TIF" =
 FILE_NAME_QUALITY_L1_RADIOMETRIC_SATURATION =
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_QA_RADSAT.TIF" =
 FILE_NAME_ANGLE_COEFFICIENT =
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_ANG.txt" =
 FILE_NAME_ANGLE_SENSOR_AZIMUTH_BAND_4 =
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_VAA.TIF" =
 FILE_NAME_ANGLE_SENSOR_ZENITH_BAND_4 =
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_VZA.TIF" =
 FILE_NAME_ANGLE_SOLAR_AZIMUTH_BAND_4 =
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_SAA.TIF" =
 FILE_NAME_ANGLE_SOLAR_ZENITH_BAND_4 =
 "LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_SZA.TIF"

```

FILE_NAME_METADATA_ODL                                     =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_MTL.txt"
FILE_NAME_METADATA_XML                                     =
"LC08_L1TP_233074_20240105_20240113_02_T1_MTL.xml"
FILE_NAME_CPF = "LC08CPF_20240101_20240331_02.02"
FILE_NAME_BPF_OLI = "LO8BPF20240105140003_20240105153843.01"
FILE_NAME_BPF_TIRS = "LT8BPF20231227154959_20240106103907.03"
FILE_NAME_RLUT = "LC08RLUT_20150303_20431231_02_01.h5"
DATA_SOURCE_TIRS_STRAY_LIGHT_CORRECTION = "TIRS"
DATA_SOURCE_ELEVATION = "GLS2000"
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 5
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 362
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 7.396
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 5.688
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 4.727
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 123
GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 4.160
END_GROUP = LEVEL1_PROCESSING_RECORD
GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 786.06049
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -64.91313
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 804.93555
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -66.47184
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 741.74121
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -61.25323
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 625.47797
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -51.65218
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 382.76132
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -31.60855
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 95.18926
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = -7.86076
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 32.08388
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -2.64950
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 707.86890
RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -58.45605
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 149.59180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_9 = -12.35334
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_10 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_10 = 0.10033
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_11 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_11 = 0.10033
END_GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_REFLECTANCE
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 1.210700

```



```

REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_6 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_8 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_9 = -0.099980
END_GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_2 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_2 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_3 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_3 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_4 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_4 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_5 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_5 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_6 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_6 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_7 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_7 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_8 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_8 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_9 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_9 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_10 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_10 = 1
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_11 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
END_GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2985E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3297E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.2253E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0333E-02
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.3230E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5725E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.3001E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1694E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4712E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.92612
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -66.48513
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -61.26548
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -51.66251
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -31.61488
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.86233
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.65003
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -58.46774
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.35581
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000

```

```

RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.10000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.10000
END_GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = LEVEL1_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442
END_GROUP = LEVEL1_THERMAL_CONSTANTS
GROUP = LEVEL1_PROJECTION_PARAMETERS
MAP_PROJECTION = "UTM"
DATUM = "WGS84"
ELLIPSOID = "WGS84"
UTM_ZONE = 19
GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
ORIENTATION = "NORTH_UP"
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
END_GROUP = LEVEL1_PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = LANDSAT_METADATA_FILE
END

```