

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Mapping Rice Cropping Systems in Data-Scarce Regions Using NDVI Time-Series and Dynamic Time Warping Clustering: A Case Study of Maliana, Timor-Leste (東ティモールのデータ不足地域を対象とした時系列 NDVI と動的時間伸縮法クラスタリングによる稲作体系マッピング)
氏 名 (Name)	PEDRO JUNIOR FERNANDES
1. Background and Rationale Timor-Leste's rice sector faces constraints due to limited field calendars, incomplete irrigation-service records, and inconsistent water delivery across canal command areas. The Maliana basin represents a policy-relevant irrigated rice landscape in which monsoonal seasonality and canal-based water management likely produce spatially structured variations in crop timing and dry-season persistence. This dissertation presents an update-ready remote-sensing workflow designed to extract and map probable rice-cropping regimes from high-resolution NDVI time series, and to interpret these regimes using convergent, non-causal evidence from rainfall timing and irrigation context overlays. 2. Aim and Research Questions The aim of this research is to implement a transparent and adaptable workflow that characterizes field-relevant rice phenology patterns within a data-scarce irrigation scheme. Additionally, the study seeks to interpret spatial regime structures in terms of rainfall timing and infrastructure context. The following research questions are operationalized in this dissertation: • What distinct phenological regimes, as derived from NDVI data, exist across the cultivated rice domain in Maliana? • Do these regimes demonstrate different rainfall-NDVI lag structures that are consistent with either buffered or rainfall-dependent growth timing? • Do the mapped regimes exhibit spatial plausibility in relation to canal infrastructure and dry-season greenness patterns, serving as a form of qualitative plausibility check? 3. Study area and datasets a) The study area comprises the Maliana basin in Bobonaro, a lowland alluvial plain characterized by distinct monsoonal wet and dry seasons. The region includes two gravity irrigation schemes, Maliana-I and Maliana-II. b) PlanetScope PSScene-Surface Reflectance imagery was processed to generate Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values, which were aggregated into 48 monthly observations from December 2018 to November 2022. Scenes were excluded if metadata indicated cloud cover greater than 20% or severe off-nadir geometry. c) Monthly rainfall data were aligned with the 48-month observation window and used exclusively for rainfall-NDVI lag diagnostics to inform subsequent interpretation and labeling.	

- d) Orthophotos and canal or control-structure layers were used for overlay-based plausibility checking and, where applicable, for optional distance-to-canal diagnostics.

4. Methods

a) Spatial Framework and Time-Series Extraction

- All datasets were standardized to WGS84 / UTM Zone 51S (EPSG:32751), and geoprocessing was conducted using QGIS 3.40.3.
- A cultivated or rice-area mask was applied to ensure that clustering labels were assigned only to cultivated parcels, thereby maintaining defensibility.
- The spatial unit was a 25 m hexagonal grid. The analysis domain included 14,101 cultivated hexagons, resulting in an $N \times T$ NDVI matrix with $T = 48$ months.

b) Time-Series Clustering and Cluster-Number Selection

- NDVI series were normalized using min-max scaling to enable shape-based comparison prior to clustering.
- Clustering was performed using DTW-based *TimeSeriesKMeans* with DBA barycenter prototypes.
- Although inertia indicated that a higher k (approximately 4) could be justified if inertia were the sole criterion, $k = 2$ was selected based on a combined assessment of inertia shape, peak silhouette at $k = 2$, principal component analysis (PCA) separability and interpretability, and supporting indices such as DBI and CHI.
- Reported silhouette values were 0.517 for $k = 2$, and lower for $k = 3$ to 5 (0.472, 0.477, 0.447, respectively).

c) Phenology Metrics and Interpretation Diagnostics

- Phenology metrics were derived using explicit thresholds, including months with NDVI below 0.45, above 0.60, and peaks above 0.55, and summarized for each cluster.
- Rainfall-NDVI lag diagnostics assessed timing consistency across clusters. Results were interpreted as indicating association and timing, not causality. Overlays were used as qualitative plausibility validation, with explicit acknowledgment of the absence of formal proximity statistics and operational delivery measurements.

5. Results

- The final partition identified 14,101 cultivated cells, with Cluster 1 containing 3,684 cells (26.13%) and Cluster 2 containing 10,417 cells (73.87%).
- Assuming a full-hexagon area with a 25-meter edge length, the total area is approximately 2,289.7 hectares. Cluster 1 covers approximately 598.2 hectares, while Cluster 2 covers approximately 1,691.5 hectares.
- Cluster 1 shows higher canopy vigor (mean NDVI 0.5420 vs. 0.4693), fewer low-canopy months (6 vs. 25), more high-vigor months (11 vs. 7), and more peaks (8 vs. 6), corresponding to 2.0 versus 1.5 cycles per year.
- The regime interpretation is considered probable. Cluster 1 appears to be associated with irrigation-buffered double-cropping, whereas Cluster 2 is linked to rainfall-dependent single-season behavior. However, these associations do not represent confirmed management categories.

- Cluster 1 peaks at a lag of 1 month ($r = 0.358$), consistent with a more buffered, rapid response. In contrast, Cluster 2 peaks at three months ($r = 0.595$) and also at two months ($r = 0.525$), indicating a delayed response that depends on cumulative moisture.
- Canal overlays and off-season mosaics show Cluster 1 in well-served canal areas and Cluster 2 in marginal or rain-dependent zones. These are treated as plausibility evidence, not as a quantified hydraulic-reach model.

6. Discussion

- The two-regime structure is supported through internal validation methods, including inertia behavior, silhouette analysis, principal component analysis, and additional supporting indices. Interpretable phenology metrics are used to emphasize parsimony rather than over-partitioning.
- Water control is the most plausible organizing factor consistent with the observed patterns; however, this is explicitly framed as a convergent interpretation based on phenology, lag timing, and infrastructure context, rather than as definitive causal evidence.

7. Limitations and scope conditions

- Labels are based on time-series behavior and threshold analysis, but are not validated against field calendars, yield data, or delivery logs. Management decisions may influence NDVI curves independently of water control.
- Canal layers represent designed infrastructure, while actual water delivery depends on operations, maintenance, sedimentation, gate control, and farmer withdrawals. As a result, canal overlays are used here as qualitative evidence of plausibility.
- NDVI is limited by saturation at high biomass levels and is sensitive to atmospheric artifacts. Monthly compositing may also miss short-duration events such as flooding or transplanting.
- Local soil, topography, and groundwater conditions may confound greenness patterns in areas far from canals or reduce greenness near canals.

8. Conclusion and future work

- This dissertation presents an update-ready, high-resolution regime-mapping workflow using 48 monthly PlanetScope NDVI observations from December 2018 to November 2022. Data are aggregated to a 25-meter hexagonal grid and clustered with DTW-k-means to address phenological misalignment. The selected $k = 2$ partition is internally validated and produces two interpretable regimes. Their phenology metrics and rainfall-lag timing patterns differ in ways consistent with irrigation buffering rather than rainfall dependence, while avoiding causal claims.
- Future work priorities include: (i) targeted ground truthing (planting and harvest dates, yields, delivery documentation), (ii) improved contextual layers (canal condition, outlet use timing, soils), (iii) stronger attribution designs (proximity metrics, upstream and downstream segmentation, before and after rehabilitation), and (iv) scaling and automation for routine district-wide monitoring.

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Mapping Rice Cropping Systems in Data-Scarce Regions Using NDVI Time-Series and Dynamic Time Warping Clustering: A Case Study of Maliana, Timor-Leste (東ティモールのデータ不足地域を対象とした時系列 NDVI と動的時間伸縮法クラスタリングによる稲作体系マッピング)
氏 名 (Name)	PEDRO JUNIOR FERNANDES
1. 背景・研究の位置づけ 東ティモールの稲作セクターは、圃場ごとの作付暦情報の不足、灌漑サービス記録の欠落、用水路コマンドエリア内での配水の不均一性といった制約を抱えている。ボボナロ県マリアナ盆地は、政策的にも重要な灌漑稲作景観であり、モンスーンによる強い季節性と、用水路に基づく水管理によって、作期（作物生育タイミング）や乾季の緑度持続性が空間的に構造化されている可能性が高い。 本論文では、高解像度の NDVI（正規化植生指数）時系列から、稲作の作付けレジームを推定・地図化する「更新可能なリモートセンシング・ワークフロー」を提示する。さらに、降雨タイミングと灌漑インフラ重ね合わせ（overlay）という非因果的だが相互に補強し合う複数証拠に基づき、得られたレジームを解釈する枠組みを提案する。 2. 研究目的と研究課題 本研究の目的は、データ不足の灌漑地区において、圃場スケールで意味のある稲のフェノロジー（季節生育パターン）を抽出・特徴付けできる、透明性が高く適応可能なワークフローを実装することである。加えて、空間的に分布するレジーム構造を、降雨タイミングおよびインフラ文脈（灌漑施設）と関連付けて解釈する。 本論文では、以下の研究課題を設定した。 - マリアナの稲作域において、NDVIに基づきどのようなフェノロジー・レジームが識別されるか。 - 各レジームは、灌漑による緩衝型か、降雨依存型かを示唆するような、異なる降雨-NDVI ラグ構造を持つか。 - 得られたレジームは、用水路インフラおよび乾季の緑度と整合する空間的妥当性を示すか（定量モデルではなく、質的な妥当性チェックとして）。	

3. 研究対象地域と使用データ

対象地域は、ボボナロ県マリアナ盆地の低地沖積平野であり、雨季・乾季が明瞭なモンスーン気候に特徴づけられる。地域内には重力式灌漑（gravity irrigation）のマリアナ I およびマリアナ II の 2 灌漑地区が存在する。

衛星データは PlanetScope の PSScene（Surface Reflectance）画像を処理し、NDVI を算出した。2018 年 12 月～2022 年 11 月の期間について、月次で合成・集約し、48 か月の月次 NDVI 観測を作成した。メタデータ上で雲量が 20% を超えるシーン、またはオフナディア角が大きいなど幾何条件が不良なシーンは除外した。

月別降雨量データは 48 か月の観測窓に整合させ、降雨-NDVI ラグ診断のみに使用し、以後の解釈・ラベリングの補助情報とした。さらに、オルソ画像および用水路・制御構造物レイヤを重ね合わせ、質的な妥当性チェック、ならびに必要なに応じて用水路までの距離診断に利用した。

4. 手法

1) 空間フレームワークと時系列抽出

- すべてのデータを WGS84 / UTM Zone 51S（EPSG:32751）に統一し、QGIS 3.40.3 で処理した。
- 水田（または耕作地）マスクを適用し、クラスタラベルが耕作区画に限定されるようにして、結果の説明可能性を確保した。
- 空間単位は 25 m 六角形グリッドとし、耕作域に該当する六角形は 14,101 セルとなった。これにより、 $T=48$ （月）からなる NDVI 時系列を各セルに割り当て、 $N \times T$ の NDVI 行列を構築した。

2) 時系列クラスタリングとクラスタ数の選定

クラスタリング前に、min-max スケーリングで NDVI 系列を正規化し、形状比較を可能にした。

- DTW（Dynamic Time Warping）に基づく TimeSeriesKMeans を用い、DBA（DTW barycenter averaging）により代表系列（バリセンター）を推定した。
- 慣性（inertia）のみを基準にすれば $k \approx 4$ も成立し得るが、(i) 慣性曲線の形状、(ii) $k=2$ でのシルエットの最大（0.517）、(iii) PCA による分離性と解釈可能性、(iv) DBI や CHI 等の補助指標を総合し、 $k=2$ を採用した。なお、シルエット値は $k=3 \sim 5$ で 0.472、0.477、0.447 と低下した。

3) フェノロジー指標と解釈診断

- 明示的な閾値に基づき、NDVI<0.45 の月数、NDVI>0.60 の月数、ピーク (NDVI>0.55) 回数などのフェノロジー指標を算出し、クラスタ別に要約した。
- 降雨-NDVI ラグ診断により、クラスタ間でタイミングの一貫性を検討した。結果は関連とタイミングを示すものとして解釈し、因果は主張しない。
- 用水路重ね合わせや乾季モザイクは、定量的な近接統計や実運用の配水測定が欠如していることを明示した上で、**質的な妥当性検証**として位置づけた。

5. 結果

- 耕作セル 14,101 のうち、Cluster 1 は 3,684 セル (26.13%)、Cluster 2 は 10,417 セル (73.87%) であった。
- 六角形の辺長を 25 m とする「完全六角形面積」を仮定した場合、総面積は約 2,289.7 ha、Cluster 1 は約 598.2 ha、Cluster 2 は約 1,691.5 ha に相当する。
- Cluster 1 は、平均 NDVI が高く (0.5420 vs 0.4693)、低植被月が少なく (6 vs 25)、高活力月が多く (11 vs 7)、ピーク回数も多い (8 vs 6)。年あたりのサイクルは 2.0 (Cluster 1) 対 1.5 (Cluster 2) であり、Cluster 1 はより高頻度の作付けを示唆する。
- レジーム解釈は「確からしい (probable)」と位置づけ、Cluster 1 は灌漑により緩衝された二期作、Cluster 2 は降雨依存の一期作的挙動と整合すると解釈した。ただし、これらは確定的な営農区分ではない。
- 降雨-NDVI ラグでは、Cluster 1 が 1 か月ラグで最大 ($r=0.358$) となり、より迅速で緩衝的な応答を示した。一方、Cluster 2 は 3 か月ラグ ($r=0.595$) および 2 か月ラグ ($r=0.525$) でも高く、累積水分に依存する遅れた応答を示した。
- 用水路重ね合わせと非作期モザイクは、Cluster 1 が給水条件の良い地域に、Cluster 2 が周縁・雨水依存域に多いことを示し、これは水理到達範囲モデルの定量評価ではなく、妥当性を補強する証拠として扱った。

6. 考察

2 レジーム構造は、慣性、シルエット解析、PCA、ならびに補助指標による内部妥当性検証によって支持された。過剰分割よりも**簡潔性を重視し、解釈可能なフェノロジー指標により両レジームの差異を明確化した。

観測された差異を最も合理的に説明する要因は水管理) であるが、本研究ではそれを断定的因果としてではなく、フェノロジー、ラグタイミング、インフラ文脈を統合した収束的解釈として提示する。

7. 限界と適用条件

- ラベルは時系列挙動と閾値指標に基づくが、作付暦、収量、配水ログ等による検証は行っていない。営農判断は水管理以外の要因でも NDVI に影響し得る。
- 用水路レイヤは設計上の施設を表す一方、実際の配水は運用、維持管理、堆砂、ゲート操作、農家の取水行動に依存するため、重ね合わせは質的妥当性証拠に留まる。
- NDVI は高バイオマス域で飽和しやすく、大気影響にも敏感である。月次合成では短期イベント（冠水、移植等）を取りこぼす可能性がある。
- 土壌、微地形、地下水などの局所条件が緑度に交絡し、用水路から遠い地点で緑度が維持されたり、近い地点で低下したりする場合がある。

8. 結論と今後の課題

- 本論文は、2018 年 12 月～2022 年 11 月の PlanetScope 月次 NDVI（48 観測）を用い、25 m 六角形グリッドへ集約した上で、DTW-k-means によりフェノロジーの位相ずれを考慮したレジームマッピングを実施した。内部検証に基づき $k=2$ を採用し、解釈可能な 2 レジームを得た。両者はフェノロジー指標と降雨ラグの挙動が異なり、因果主張を避けつつ、灌漑による緩衝と降雨依存の違いと整合する結果を示した。
- 今後の優先課題として、(i) 植付・収穫日の現地確認、収量、配水資料等によるターゲット型グラウンドトゥールズ、(ii) 用水路状態・取水口利用時期・土壌等の文脈レイヤ強化、(iii) 近接指標や上流・下流分節、改修前後比較などのより強い帰属設計、(iv) 行政区レベルでの定常モニタリングに向けたスケーリングと自動化、を提案する。

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Pedro Junior Fernandes
審 査 委 員	主 査：長井 正彦
	副 査：今岡 啓治
	副 査：大澤 高浩
	副 査：佐村 俊和
	副 査：江口 毅
論 文 題 目	Mapping Rice Cropping Systems in Data-Scarce Regions Using NDVI Time-Series and Dynamic Time Warping Clustering: A Case Study of Maliana, Timor-Leste (東ティモールのデータ不足地域を対象とした時系列 NDVI と動的時間伸縮法クラスタリングによる稲作体系マッピング)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 アジアの食料安全保障にとって稲作は重要な役割を果たしている。しかし、開発途上国では、十分な in-situ 農業データがなく、またアップデートもされていないため、効果的な稲作管理ができていない地域も多い。特に、東ティモールは、不十分な灌漑管理や気候変動等の影響を受け収量が低く、ダイナミックに変動する空間的かつ詳細な稲作管理情報の必要性が非常に高い。このような状況において、リモートセンシングによる時系列衛星データの活用は、空間的かつ時系列な水稻フェノロジー（水稻の発芽、開花、結実、成熟といった季節ごとの成長段階や状態の変化）を監視するための信頼性の高い手段となる。本研究では、衛星データ（PlanetScope 衛星）による高頻度 NDVI データを東ティモールのマリアナ流域の稲作体系マップに変換し、これらの体系を降雨パターンや重力灌漑の範囲と結び付ける合理化されたワークフローを開発した。特に、フィールドデータが不足している地域において実用的な情報を整備し、灌漑用水路と稲作のオフシーズンの水管理と衛星データによるフェノロジーの関連性を評価し、更新可能なリモートセンシングによる稲作管理のワークフローを開発した。 本論文は 7 章から構成されており、第 1 章では東ティモールの稲作における社会的な背景、研究課題と目的、論文の全体構成について述べた。 第 2 章では既存研究に対する本研究の位置付けや衛星データの農業利用やヘキサゴングリッド、DTW(動的時間伸縮法クラスタリング)等の既存の手法について整理し述べた。 第 3 章では研究対象地域である東ティモールのマリアナ流域や研究に衛星データやドローンによる現地調査について述べた。 第 4 章では衛星データの前処理手法について述べた。衛星データ解析、ヘキサゴングリッドによる空間処理、時系列クラスタリングについて述べた。	

(様式 9 号)

第 5 章では解析結果について述べた。時系列の衛星データを利用したクラスタリングの結果を可視化して示した。

第 6 章では解析結果について論理的に分析し、結果の信頼性や背景を考慮した解釈を行った。

第 7 章では本研究の結論を総括し、展望を述べた。主な成果は以下の通り。

- 1) マリアナ流域における水稻フェノロジーを特徴付ける統合的なリモートセンシングワークフローを開発した。
- 2) 高解像度の時系列衛星データを 25m のヘキサゴングリッドに集約することで、空間サマリーが安定化し、最適なクラスタリング実現した。
- 3) 統合アプローチにより、灌漑緩衝地帯と降雨依存地帯を区別する、意思決定に即した地図と解釈可能なフェノロジー指標が得られた。
- 4) これらの情報は、生産計画、水資源投資、そして気候リスク管理に利用することができる。

公聴会には、32 名の参加があった。公聴会での主な質問は、①グリッドサイズにおける予測解像度やグリッドの重複の影響について、②降雨観測所のデータを 1 箇所だけ使用した理由について、③本研究の成果が短期的それとも長期的な意思決定に役立つかについて、④この成果の利用者は誰なのかについて、⑤研究の制限を解決する方法について、であり、活発な質疑応答が行われ、いずれの質問に対しても発表者からは適切な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分に値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する回答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 計 2 編）

- 1) Pedro Junior Fernandes and Masahiko Nagai, Mapping Rice Cropping Systems in Data-Scarce Regions Using NDVI Time-Series and Dynamic Time Warping Clustering: A Case Study of Maliana, Timor Leste, Applied Science Journal (MDPI), 15 (23), 12544, November 2025.
- 2) Pedro J.F. , Masahiko N, Indicative Mapping of Rice Cropping Systems in Timor-Leste Using PlanetScope NDVI Time Series and DTW Clustering, Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) Proceeding, November 2025.