

**Avanzando la Representación de la Heterogeneidad de la Superficie Terrestre
en Modelos de Superficie Terrestre**

por

Laura P. Torres Rojas

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad de Duke

Fecha de Defensa: **2 de abril de 2024**
AC **TRADUCCIONES**
Oficiales, Corporativas, Técnicas y Legales
Aprobado:

Nathaniel W. Chaney, Asesor

Wenhong Li

Gabriel Katul

Simon Stisen

Disertación presentada como requisito parcial para la obtención del grado de
Doctora en Filosofía en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental en la
Escuela de Posgrado de la Universidad de Duke

2024



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102
Tel: +57 (601) 691 3148; Cel: 316 351 7615 - 315 867 7892
Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359
Web: www.actraducciones.com
E-mail: a.ctraduccion@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
0412-March 11th 2015
2 July
Certified Translator & Interpreter
English - Spanish - English
Email: ministerio@doctor.com

TABLA DE CONTENIDO		
<i>Resumen</i>		<i>iv</i>
<i>Lista de Tablas</i>		<i>xiii</i>
<i>Lista de Figuras</i>		<i>xiv</i>
<i>Agradecimientos</i>		<i>xvii</i>
1. Introducción		1
1.1 Antecedentes y Motivación		1
1.1.1 Esquemas de Mosaico Sub-Celda		3
1.1.2 Evaluación de Modelos de Superficie Terrestre		5
1.1.3 Esquemas de Enrutamiento Fluvial en ESMs		8
1.2 Objetivos y Panorama de los Capítulos Subsiguientes		10
2. Hacia una Representación Óptima de la Heterogeneidad Sub-Celda en Modelos de Superficie Terrestre		14
2.1 Introducción		14
2.2 Datos y Métodos		19
2.2.1 Dominio de Estudio		19
2.2.2 Marco de Modelación: HydroBlocks		20
2.2.3 Esquema de Mosaico Multivariado Jerárquico (HMC)		21
2.2.4 Función de Covarianza Espacial Empírica (ESCF)		23



2.2.5 Modelo de Bosques Aleatorios para Predecir ESCFs	25
2.2.6 Aproximando una Configuración Casi-Completamente Distribuida	26
2.2.7 Análisis de Sensibilidad Sobol	28
2.2.8 Optimización Multi-Objetivo de la Configuración de Mosaico	29
2.3 Resultados	31
2.3.1 Desempeño del Modelo Sustituto	31
2.3.2 Avanzando hacia una Métrica Sensible al Patrón de Concordancia entre Medidas de Heterogeneidad: ESCF-KGE	32
2.3.3 Análisis de Sensibilidad Sobol	40
2.3.4 Métrica Combinada	41
2.4 Discusión	43
2.4.1 Implicaciones para la Comunidad LSM y Estudios de Caso	43
2.4.2 Implicaciones Generales para el Campo ESM	45
2.4.3 Transferibilidad de la Configuración de Mosaico Óptima	46
2.4.4 Desarrollos Futuros	49
2.4.4.1 Ensamblando Configuraciones Óptimas de	49



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102

Tel: +57 (601) 691 3148; Cel: 316 351 7615 - 315 867 7892

Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359

Web: www.actraducciones.com

E-mail: a.ctraducciones@outlook.com; calfonsot@gmail.com

Dr. Edward Adams
0412-March 11th 2015
2 July
Certified Translator & Interpreter
English - Spanish - English
Email: minislerio@doctor.com

<i>Mosaico a Escalas Continentales</i>		
<i>2.4.4.2 Transición de Proxies de Paisaje de Heterogeneidad Hidrológica hacia Procesos Hidrológicos Heterogéneos</i>		49
<i>2.5 Conclusión</i>		51
<i>3. Herramienta basada en Geoestadística para caracterizar patrones espaciotemporales de datos sensados remotamente – Aplicación a campos de temperatura de superficie terrestre sobre los Estados Unidos Continentales</i>		53
<i>3.1 Introducción</i>		53
<i>3.2 Datos y Métodos</i>		61
<i>3.2.1 GOES-16 LST y Temperatura de la Superficie del Mar (SST)</i>		61
<i>3.2.2 Muestreo de Ventana Móvil</i>		65
<i>3.2.3 Función de Covarianza Espaciotemporal Empírica – ESTCF</i>		66
<i>3.2.4 Sensibilidad de ESTCFs al Muestreo</i>		71
<i>3.2.5 Modelo Paramétrico para la Función de Covarianza Espaciotemporal</i>		71
<i>3.2.6 Impacto de los Parámetros en el Modelo Paramétrico de Covarianza Espaciotemporal</i>		72



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102

Tel: +57 (601) 691 3148; Cel: 316 351 7615 - 315 867 7892

Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359

Web: www.actraducciones.com

E-mail: a.ctraducciones@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
 0412-March 11th 2015
 2 July
 Certified Translator & Interpreter
 English - Spanish - English
 Email: ministerio@doctor.com

3.2.7 <i>Análisis de Clustering y Covariables Físicas Relacionadas</i>		75
3.3 <i>Resultados</i>		77
3.3.1 <i>ESTCF sobre CONUS</i>		77
3.3.2 <i>Sensibilidad al Muestreo</i>		80
3.3.3 <i>Función de Covarianza Espaciotemporal: Modelo paramétrico sobre CONUS</i>		82
3.3.4 <i>Análisis de Clustering y Covariables Físicas Relacionadas</i>		88
3.4 <i>Discusión</i>		94
3.4.1 <i>Hallazgos Generales e Implicaciones Específicas</i>		94
3.4.1.1 <i>Implicaciones Generales</i>		94
3.4.1.2 <i>Aplicación a Temperatura de Superficie Terrestre: Implicaciones para Interacciones Tierra-Atmósfera</i>		94
3.4.2 <i>Limitaciones e Implicaciones de las Elecciones Metodológicas</i>		96
3.4.2.1 <i>Problemas respecto a ESTCF</i>		96
3.4.2.2 <i>Teledetección de LST y SST</i>		99
3.4.3 <i>Aplicaciones ESTCF</i>		100
3.4.3.1 <i>Hacia la Representación Mejorada de Interacciones Tierra-Atmósfera en ESMs</i>		100



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102

Tel: +57 (601) 691 3148; **Cel:** 316 351 7615 - 315 867 7892

Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359

Web: www.actraducciones.com

E-mail: a.ctraducciones@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
0412-March 11th 2015
2 JMG
Certified Translator & Interpreter
English - Spanish - English
Email: ministerio@doctor.com

3.4.3.2 Evaluación del Modelo: Modelos Hidrológicos Espacialmente Distribuidos		101
3.4.3.3 Caracterización Espaciotemporal para Aplicaciones Alternativas		102
3.5 Resumen y Conclusiones		104
4. Clustering Multivariado Jerárquico v0.2: Entrelazando Enrutamiento Fluvial y Mosaico de Superficie Terrestre en Modelos del Sistema Terrestre		107
4.1 Introducción		107
4.2 Datos y Métodos		114
4.2.1 Dominios de Estudio		114
4.2.2 Marco de Modelación HydroBlocks y Modelo de Superficie Terrestre		116
4.2.3 Generación Jerárquica de Mosaicos de LSM: Clustering Multivariado Jerárquico		117
4.2.4 Conjuntos de Datos de Superficie Terrestre de Alta Resolución		118
4.2.5 Esquema de Enrutamiento Fluvial		120
4.2.5.1 Flujo Superficial (Overland flow)		120
4.2.5.2 Enrutamiento Fluvial: Esquema de Rastreo de Volumen de Oleaje Cinético		120



4.2.6 Delineación del Enrutamiento Fluvial y Geometría Seccional y Transversal		123
4.2.7 Interacción Bidireccional: Acoplando Mosaicos de Superficie Terrestre y Tramos Fluviales		124
4.2.8 Generación Jerárquica Modificada de Mosaicos: HMC de 2 Pasos		125
4.2.8.1 Clustering Topológico de la Red Fluvial Sub-Celda		127
4.2.8.2 Dividiendo la Red Fluvial en Red Principal y Secundaria		129
4.2.9 Experimentos de Modelación		130
4.3 Resultados		135
4.3.1 Comparación de Flujo en Cauce – Dominio de Estudio Colorado		135
4.3.2 Media Espacial y Desviación Estándar Espacial de Flujos y Estados – Dominio de Estudio Colorado		139
4.3.3 Comparaciones a Escala CONUS		145
4.4 Discusión		148
4.4.1 Hallazgos Generales e Implicaciones		148
4.4.2 Limitaciones		150
4.4.3 Direcciones Futuras de Investigación		152
4.5 Conclusiones		153



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102

Tel: +57 (601) 691 3148; Cel: 316 351 7615 - 315 867 7892

Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359

Web: www.actraducciones.com

E-mail: a.actraducciones@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
 0412-March 11th 2015
 Certified Translator & Interpreter
 English - Spanish - English
 Email: ministerio@doctor.com

5. Aprovechando la Covarianza Espacio-Temporal para Evaluar Patrones Simulados de Temperatura de Superficie Terrestre en Modelos de Superficie Terrestre		155
5.1 Introducción		155
5.2 Datos y Métodos		161
5.2.1 Dominio de Estudio Estados Unidos Continentales (CONUS)		161
5.2.2 Marco de Modelación HydroBlocks y Modelo de Superficie Terrestre		162
5.2.3 GOES-16 LST y Temperatura de la Superficie del Mar (SST)		167
5.2.4 Experimentos de Modelación		168
5.2.4.1 Consideraciones Generales para Todos los Experimentos		168
5.2.4.2 Experimentos para Variabilidad en la Estructura del Modelo		169
5.2.4.3 Experimentos para el Rol del Entorno Físico Superficial		171
5.2.4.4 Experimentos para Incertidumbre en Parámetros de Forzamiento		172
5.2.5 Validación de Simulaciones HydroBlocks LST contra		174



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102

Tel: +57 (601) 691 3148; **Cel:** 316 351 7615 - 315 867 7892

Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359

Web: www.actraducciones.com

E-mail: a.ctraducciones@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
0412-March 11th 2015
2 JMG
Certified Translator & Interpreter
English - Spanish - English
Email: ministerio@doctor.com

Observaciones GOES-R		
5.3 Resultados		175
5.3.1 Comparación de Estadísticas Espaciotemporales LST: GOES vs. Simulación Base HydroBlocks		175
5.3.2 ESTCFs sobre CONUS – Exploración Preliminar y Comparación		178
5.3.3 Función de Covarianza Espacio-Temporal – Modelo Paramétrico sobre CONUS		180
5.3.4 Evaluación de la Influencia de la Variabilidad en la Estructura del Modelo		184
5.3.5 Evaluación de la Influencia del Entorno Físico Superficial		187
5.3.6 Evaluación de la Influencia de la Incertidumbre en Parámetros de Forzamiento		189
5.4 Discusión		191
5.4.1 Hallazgos Generales e Implicaciones		191
5.4.2 Limitaciones		193
5.5 Resumen y Conclusión		197
6. Conclusiones		200
6.1 Capítulo 2: Optimización		200
6.2 Capítulo 3: Caracterización		202



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102

Tel: +57 (601) 691 3148; Cel: 316 351 7615 - 315 867 7892

Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359

Web: www.actraducciones.com

E-mail: a.ctraducciones@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
0412-March 11th 2015
2 JMG
Certified Translator & Interpreter
English - Spanish - English
Email: minislerio@doctor.com

<i>6.3 Capítulo 4: Mejoramiento</i>		<i>203</i>
<i>6.4 Capítulo 5: Evaluación</i>		<i>205</i>
<i>Referencias</i>		<i>207</i>

Resumen

Debido a su profunda influencia en diversos procesos y fenómenos ambientales, la correcta representación de la heterogeneidad física del paisaje en los modelos es vital para aplicaciones que abarcan un amplio rango de escalas, desde la predicción climática global hasta la predicción hidrológica a escala de campo. Los Modelos de Superficie Terrestre (LSM), los Modelos del Sistema Terrestre (ESMs) y la teledetección satelital proporcionan campos espacialmente distribuidos de flujos de superficie y estados, convirtiéndolos en herramientas científicas críticas para comprender el impacto de la heterogeneidad física. Una mayor comprensión de los efectos espaciales y temporales de la heterogeneidad puede mejorar significativamente nuestra comprensión de los ciclos hidrológicos, energéticos y biogeoquímicos a múltiples escalas.

Bajo este marco, la disertación se centra en optimizar, caracterizar, evaluar y mejorar las representaciones de heterogeneidad para aplicaciones en LSM y ESM. El Capítulo 2 introduce un novedoso enfoque de optimización multi-objetivo para determinar eficientemente la configuración de representación óptima de



heterogeneidad en LSMs, considerando la estructura espacial de los campos generados, la precisión en la representación de los procesos hidrológicos y la viabilidad computacional de la estructura resultante. El Capítulo 3 se construye sobre la naturaleza espacial de este enfoque y presenta la **Función de Covarianza Espaciotemporal Empírica (ESTCF)**, una herramienta basada en geoestadística que permite caracterizar de manera eficiente y efectiva los patrones espaciotemporales observados en campos sensados remotamente y relacionarlos con las características físicas del ambiente.

Con la intención de aprovechar al máximo los datos de elevación de teledetección, el Capítulo 4 propone estrategias para mejorar el acoplamiento entre redes fluviales y las representaciones de heterogeneidad en los LSMs. Los experimentos demuestran la sensibilidad de los patrones espaciotemporales en la superficie terrestre respecto a la representación de heterogeneidad. Finalmente, la herramienta desarrollada en el Capítulo 3 y la representación de heterogeneidad propuesta en el Capítulo 4 se combinan en el Capítulo 5, donde la covarianza espacio-temporal se utiliza para evaluar los patrones espaciotemporales simulados de temperatura de superficie terrestre en LSMs.

El método propuesto resume de manera eficiente patrones complejos y ofrece valiosos conocimientos sobre las fortalezas y debilidades de los modelos. En general, esta disertación contribuye a una descripción y evaluación más estricta de la representación de la heterogeneidad del paisaje en LSMs y ESMs,



proporcionando una base para ejercicios de desarrollo de modelos más completos.

Acceda al documento completo usando el siguiente enlace:

<https://dukespace.lib.duke.edu/bitstreams/74972ec5-ffe4-4db2-99a9-6f21feb8ad54/download>

CERTIFICACIÓN DE AUTENTICIDAD DE TRADUCCIÓN

A QUIEN CORRESPONDA:

El suscrito, **Dr. Edward Adams**, con el presente doy fe que he traducido del idioma inglés al idioma español, el (los) documento(s) adjunto(s). También declaro que estoy calificado como Traductor e Intérprete oficial: Inglés Español-inglés mediante **Certificado de Idoneidad** 0412 del 11 marzo de 2015 expedido por la Universidad Nacional de Colombia. No asumo ninguna responsabilidad por el contenido del documento original en idioma inglés.

FECHA: 26 DE SEPTIEMBRE DE 2025.



Sede Calle 100: Carrera 15 No. 99 - 09 Local 102
Tel: +57 (601) 691 3148; **Cel:** 316 351 7615 - 315 867 7892
Sede Can: Calle 44 No. 54 – 22 - Cel: +57 310 613 2359
Web: www.actraducciones.com
E-mail: a.ctraducciones@outlook.com; calfonso@gmail.com

Dr. Edward Adams
0412-March 11th 2015
Certified Translator & Interpreter
English - Spanish - English
Email: ministerio@doctor.com

Advancing the Representation of Land Surface Heterogeneity in Land Surface Models

by

Laura P. Torres Rojas

Department of Civil and Environmental Engineering
Duke University

Defense Date: April 2nd, 2024

Approved:

Nathaniel W. Chaney, Advisor

Wenhong Li

Gabriel Katul

Simon Stisen

Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Civil and Environmental Engineering in The Graduate School of Duke University
2024

Contents

Abstract	iv
List of Tables	xiii
List of Figures	xiv
Acknowledgements	xvii
1. Introduction	1
1.1 Background and Motivation	1
1.1.1 Sub-Grid Tiling Schemes	3
1.1.2 Evaluation of Land Surface Models	5
1.1.3 River Routing Schemes in ESMs	8
1.2 Goals and Overview of Subsequent Chapters	10
2. Towards an Optimal Representation of Sub-Grid Heterogeneity in Land Surface Models	14
2.1 Introduction	14
2.2 Data and Methods	19
2.2.1 Study Domain	19
2.2.2 Modeling Framework: HydroBlocks	20
2.2.3 Hierarchical Multivariate Clustering (HMC) Tiling Scheme	21
2.2.4 Empirical Spatial Covariance Function (ESCF)	23
2.2.5 Random Forest Model for Predicting ESCFs	25
2.2.6 Approximating a Quasi-Fully Distributed Configuration	26
2.2.7 Sobol Sensitivity Analysis	28
2.2.8 Multi-Objective Optimization of the Tiling Configuration	29
2.3 Results	31
2.3.1 Performance of the Surrogate Model	31
2.3.2 Moving Towards a Pattern-Aware Metric of Agreement Between Heterogeneity Measures: ESCF-KGE	32
2.3.3 Sobol Sensitivity Analysis	40
2.3.4 Combined Metric	41
2.4 Discussion	43
2.4.1 Implications to the LSM Community and Case Study Findings	43
2.4.2 General Implications for the ESM field	45
2.4.3 Transferability of the Optimal Tiling Configuration	46
2.4.4 Future Developments	49
2.4.4.1 Assembling Optimal Tiling Configurations Over Continental Scales	49
2.4.4.2 Moving from Landscape Proxies of Hydrologic Heterogeneity to Hydrologic Processes Heterogeneity	49
2.5 Conclusion	51
3. A geostatistics-based tool to characterize spatio-temporal patterns of remotely sensed data – Application to land surface temperature fields over the Contiguous United States	53
3.1 Introduction	53
3.2 Data and Methods	61
3.2.1 GOES-16 LST and Sea Surface Temperature (SST)	61
3.2.2 Moving Window Sampling	65
3.2.3 Empirical Spatio-Temporal Covariance Function - ESTCF	66
3.2.4 Sensitivity of ESTCFs to Sampling	71
3.2.5 A Parametric Model for the Spatio-Temporal Covariance Function	71
3.2.6 Impact of the Parameters in the Spatio-Temporal Covariance Parametric Model	72
3.2.7 Clustering Analysis and Related Physical Covariates	75
3.3 Results	77

3.3.1	ESTCF over CONUS	77
3.3.2	Sensitivity to Sampling	80
3.3.3	Spatio-Temporal Covariance Function: Parametric model over CONUS	82
3.3.4	Clustering analysis and Related Physical Covariates	88
3.4	Discussion	94
3.4.1	General implications and specific application findings	94
3.4.1.1	General implications	94
3.4.1.2	Application to land surface temperature: Implications for land-atmosphere interactions	94
3.4.2	Limitations and implications of method choices	96
3.4.2.1	Issues regarding the ESTCF	96
3.4.2.2	Remote sensing of LST and SST	99
3.4.3	ESTCF applications	100
3.4.3.1	Towards the improved representation of land-atmosphere interactions in ESMs	100
3.4.3.2	Model evaluation: Spatially distributed hydrological models	101
3.4.3.3	Spatio-temporal characterization for alternative applications	102
3.5	Summary and Conclusions	104
4.	Hierarchical Multivariate Clustering v0.2: Intertwining River routing and Land Surface Tiling in Earth System Models	107
4.1	Introduction	107
4.2	Data and Methods	114
4.2.1	Study domains	114
4.2.2	HydroBlocks Modeling Framework and Land Surface Model	116
4.2.3	Hierarchical generation of LSM tiles: Hierarchical Multivariate Clustering	117
4.2.4	High-resolution land surface datasets	118
4.2.5	River routing scheme	120
4.2.5.1	Overland flow	120
4.2.5.2	River routing: Kinematic wave volume tracking scheme	120
4.2.6	River network delineation and cross-sectional geometry	123
4.2.7	Two-way interaction: Coupling land surface tiles and river reaches	124
4.2.8	Modified hierarchical generation of tiles: 2-Step HMC	125
4.2.8.1	Sub-grid river network topological clustering	127
4.2.8.2	Splitting River network into main and secondary	129
4.2.9	Model experiments	130
4.3	Results	135
4.3.1	Streamflow comparison – Colorado study domain	135
4.3.2	Spatial mean and spatial standard deviation of fluxes and states – Colorado study domain	139
4.3.3	CONUS-wide comparisons	145
4.4	Discussion	148
4.4.1	General findings and implications	148
4.4.2	Limitations	150
4.4.3	Future research directions	152
4.5	Conclusions	153
5.	Leveraging space-time covariance to evaluate simulated surface temperature patterns in land surface models	155
5.1	Introduction	155
5.2	Data and Methods	161
5.2.1	Continental United States (CONUS) study domain	161
5.2.2	HydroBlocks Modeling Framework and Land Surface Model	162

5.2.3	GOES-16 LST and Sea Surface Temperature (SST)	167
5.2.4	Model experiments	168
5.2.4.1	General considerations for all the experiments	168
5.2.4.2	Experiments for model structure variability	169
5.2.4.3	Experiments for role of surface physical environment	171
5.2.4.4	Experiments for forcing parameters uncertainty	172
5.2.5	Validation of HydroBlocks LST simulations against GOES-R observations	174
5.3	Results	175
5.3.1	Comparison of spatiotemporal LST statistics: GOES vs. baseline HydroBlocks simulation	175
5.3.2	ESTCFs over CONUS – Preliminary exploration and comparison	178
5.3.3	Spatio-Temporal Covariance Function - Parametric model over CONUS	180
5.3.4	Evaluation of the influence of the model structure variability	184
5.3.5	Evaluation of the influence of surface physical environment	187
5.3.6	Evaluation of the influence of forcing parameters uncertainty	189
5.4	Discussion	191
5.4.1	General findings and implications	191
5.4.2	Limitations	193
5.5	Summary and Conclusion	197
6.	Conclusions	200
6.1	Chapter 2: Optimization	200
6.2	Chapter 3: Characterization	202
6.3	Chapter 4: Improvement	203
6.4	Chapter 5: Evaluation	205
	References	207

Abstract

Due to its profound influence on various environmental processes and phenomena, the correct representation of landscape physical heterogeneity in models is vital for applications spanning a wide range of scales, from global climate prediction to field-scale hydrological forecasting. Land Surface Models (LSM), Earth System Models (ESMs), and satellite remote sensing provide spatially distributed fields of surface fluxes and states, making them critical scientific tools for understanding the impact of physical heterogeneity. Enhanced understanding of heterogeneity's spatial and temporal effect can significantly improve our comprehension of hydrological, energy, and biogeochemical cycles at multiple scales. Under this framework, the dissertation focuses on optimizing, characterizing, evaluating, and improving heterogeneity representations for LSM and ESM applications. Chapter 2 introduces a novel multi-objective optimization approach to efficiently determine optimal heterogeneity representation configuration for LSMs while considering the spatial structure of the generated fields, the accuracy of the representation of hydrological processes, and the computational trackability of the resulting structure. Chapter 3 builds upon the spatial nature of this approach and presents the Empirical Spatio-Temporal Covariance Function (ESTCF), a tool based on geostatistics that allows to efficiently and effectively characterize the spatio-temporal patterns observed in remotely sensed fields and relate them to physical characteristics of the environment. Intending to use remote sensing elevation data to its maximum, Chapter 4 proposes strategies to improve the coupling between river networks and heterogeneity representations in LSMs. Experiments demonstrate the sensitivity of spatiotemporal patterns in the land surface to the heterogeneity representation. Finally, the tool developed in Chapter 3 and the heterogeneity representation proposed in Chapter 4 are combined in Chapter 5, where the space-time covariance is used to evaluate LSM simulated spatio-temporal patterns of land surface temperature. The proposed method efficiently summarizes complex patterns and offers valuable insights into model strengths and weaknesses. Overall, this dissertation contributes to a stricter description and assessment of the landscape heterogeneity representation in LSMs and ESMs, providing a foundation for more comprehensive model development exercises.

Access the full document using the following link:

<https://dukespace.lib.duke.edu/bitstreams/74972ee5-ffe4-4db2-99a9-6f21feb8ad54/download>