

**Modelo para las aspersiones con glifosato:
frontera Ecuador-Colombia**

Peter Benner

Hermann Mena

René Schneider

Peter Benner
Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems
Sandtorstr. 1
D-39106 Magdeburg
Germany
benner@mpi-magdeburg.mpg.de

and

Mathematics in Industry and Technology
Fakultät für Mathematik
TU Chemnitz
D-09107 Chemnitz
Germany
benner@mathematik.tu-chemnitz.de

Hermann Mena
Department of Mathematics
University of Innsbruck
Technikerstraße 19a
A-6020 Innsbruck
Austria
hermann.mena@uibk.ac.at

René Schneider
Mathematics in Industry and Technology
Fakultät für Mathematik
TU Chemnitz
D-09107 Chemnitz
Germany
rene.schneider@mathematik.tu-chemnitz.de

**Peter Benner
Hermann Mena
René Schneider**

**Modelo para las aspersiones con glifosato:
frontera Ecuador-Colombia**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Book cover designend by Zoran Jovic.

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3061-7

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

A mis Anthonys

H. Mena

Preface

Glyphosate is one of the herbicides used by the Colombian government to spray coca fields close to the Ecuadorian border. The sprays have taken place for a number of years and have been more frequent after 2000, when Plan Colombia started.

Spray drifts into Ecuadorian territory became a big issue for people living close to the border. Their negative impact on health and agriculture have been observed and confirmed by intensive studies, e.g., [5]. Hence, in 2005 Ecuador and Colombia signed an agreement to stop the sprays in a 10 km corridor along the border. However, measurements on Ecuadorian territory indicated that significant amounts of Glyphosate spray had still drifted into Ecuador. The sprays stopped in 2007 and a trial at the International Court of Justice started. In September 2013 the case was settled with an agreement that “sets out operational parameters for Colombia’s spraying programme, records the agreement of the two Governments to ongoing exchanges of information in that regard, and establishes a dispute settlement mechanism”[88]. In the settlement Colombia also agreed to pay 15 million US dollars to Ecuador [63].

In 2009 we started working on the project *Simulation of the Glyphosate Aerial Spray Drift at the Ecuador-Colombia Border* founded by the Ecuadorian National Science Foundation (SENESCYT) and Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. The main goal of the project was to develop a numerical simulation of the spray drift in specific zones at the border. A mathematical model and corresponding simulations in two dimension are shown in [8]. Simulations in three dimensions were performed in large domains, e.g., 13km x 10km x 200m, resulting in large scale problems. Therefore, the state-of-the-art software KARDOS was used in collaboration with Prof. Dr. Jens Lang from Technische Universität Darmstadt, Germany, see [7]. Parts of these papers are the core of

this book.

During the project we faced many problems. Some resulted from the fact that there was little expertise at Escuela Politécnica Nacional handling such scientific projects with social impact. However, we accomplished the main goals, also a Supercomputing Center for the Department of Mathematics at Escuela Politécnica Nacional was set up. Further technical difficulties arose from the vast, diverse and sometimes contradictory, information about the sprays at the Ecuador-Colombia border. These are a critical part of the input data of the model. The meteorology conditions are difficult to estimate due to the geographical location. The resulting lack of reliable information constrains the accuracy of the model to an extent that the uncertainty in the results is too high to assess whether the agreement signed by the two countries has been respected. However, the results presented in this work can be used as a starting point for more accurate models.

We wrote this book in order to impart some of the results of this project to a *non-expert* audience. We tried to keep the book as simple as possible, especially in the mathematical aspects. We report briefly the antecedents of the sprays at the Ecuador-Colombia border. Then, we describe the Glyphosate and the aerial spray drift, which is the phenomenon that we want to model. Further, we describe the aerial sprays according to Plan Colombia in order to show the affected zones at the border. Finally, after reviewing existing aerial spray drift models and pointing out the main physical effects (e.g. turbulence), we propose our mathematical model and perform some numerical simulations.

We decided to write the book in Spanish as the topic might be most relevant to a Spanish speaking audience.

Acknowledgments. Our special thanks goes to Marco Mena, who read the entire manuscript several times and suggested many corrections and improvements. Moreover, for his patience and inspiring discussions about the first three chapters. We thank Prof. Dr. Jens Lang and his group for there support with the 3D simulation. We also thank Jens Saak for several suggestions on the numerical simulation. H. Mena thanks the University of Innsbruck, where this book was finished.

Prefacio

El glifosato es uno de los herbicidas usados por el gobierno Colombiano para fumigar plantaciones de coca cerca de la frontera con Ecuador. Las fumigaciones se realizan desde hace varios años y son más frecuentes desde el 2000, año en el cual empezó el Plan Colombia.

La deriva de las fumigaciones en territorio ecuatoriano ha sido un gran problema para los pobladores de la región fronteriza. Su impacto negativo en la salud de las personas y el medio ambiente ha sido objeto de varios estudios, e.g., [5]. Por esta razón, en el año 2005 Ecuador y Colombia firmaron un acuerdo de no fumigar en una franja de 10km a lo largo de la frontera. Sin embargo, estudios en la frontera indicaron que cantidades significativas del herbicida habría alcanzado territorio ecuatoriano. Las fumigaciones en la frontera finalizaron en el año 2007 y fue planteado un juicio por parte del Ecuador en la Corte Internacional de Justicia.

En septiembre 2013 el juicio se finiquitó mediante un acuerdo que “establece parámetros de operación para el programa de fumigación de Colombia, registra el acuerdo de los dos Gobiernos para intercambiar información al respecto de manera continua, y establece un mecanismo de solución de diferencias” [88]. En el acuerdo Colombia se comprometió a pagar 15 millones de dólares a Ecuador [63].

En el año 2009 empezamos a trabajar en el proyecto de investigación *Simulación de la fumigación con glifosato en el frontera con Colombia* financiado por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) y la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador. El principal objetivo de este proyecto fue desarrollar una simulación numérica de las fumigaciones con glifosato en zonas sensibles de la frontera. Un modelo matemático y la simulación numérica en dos dimensiones se muestran en [8]. Simulaciones

en tres dimensiones en dominios grandes, e.g., 13km x 10km x 200m, resultan en problemas a gran escala. Por esta razón, el software de última generación KARDOS se utilizó en colaboración con el Prof. Dr. Jens Lang de la Universidad Técnica de Darmstadt en Alemania, ver [7]; partes de estos artículos científicos son la base de este libro.

Durante el proyecto enfrentamos muchos problemas, algunos resultado de la poca experiencia, en la parte administrativa, al interior de la Escuela Politécnica Nacional para manejar este tipo de proyectos con impacto social. Sin embargo, se cumplieron todos los objetivos, incluso la implementación de un Centro de Super Computación en el Departamento de Matemática de la Escuela Politécnica Nacional. Enfrentamos también dificultades técnicas principalmente debido a la gran cantidad de información, a veces contradictoria, acerca de los procedimientos de fumigación en la frontera. Las condiciones meteorológicas en la región son difíciles de estimar debido a la ubicación geográfica de las zonas de estudio. Además, la falta de información confiable influye en la precisión del modelo de manera que la incertidumbre en los resultados no permiten afirmar si el acuerdo firmado por los dos países ha sido respetado. Sin embargo, los resultados presentados en este trabajo puede servir como punto de partida para formular modelos más precisos.

Escribimos este libro con el objetivo de dar a conocer los resultados de este proyecto a la gente *no experta*. Tratamos de describir el modelo de una forma simple evitando en lo posible aspectos matemáticos teóricos. Se presentan brevemente los antecedentes de las fumigaciones en la frontera. Luego, describimos el glifosato y la deriva aérea; el cual es el fenómeno que modelamos. Además describimos las fumigaciones en el Plan Colombia para identificar las zonas de estudio. Finalmente, revisamos los modelos de aspersiones aéreas de la literatura y fenómenos físicos relevantes (e.g. la turbulencia) y proponemos nuestro modelo matemático así como su respectiva simulación numérica.

Decidimos escribir el libro en español, pues consideramos que el tema tiene mayor relevancia en la población hispano hablante.

Agradecimientos. Queremos agradecer especialmente a Marco Mena, que revisó todo el manuscrito varias veces y sugirió muchas correcciones y mejoras. Mas aún, por su paciencia e inspiradoras discusiones acerca de los tres prime-

ros capítulos. Agradecemos al Prof. Dr. Jens Lang y su grupo de investigación por su apoyo con las simulaciones en tres dimensiones. También expresamos nuestro agradecimiento a Jens Saak por varias sugerencias respecto a la simulación numérica. H. Mena agradece a la Universidad de Innsbruck, donde fue terminado este libro.

Índice general

Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de cuadros	XV
1. Plan Colombia y el Ecuador	3
2. Glifosato y deriva aérea	9
2.1. Generalidades	14
2.1.1. Productos usados en la erradicación de cultivos ilícitos	23
2.1.2. Manipulación y almacenamiento	27
2.2. Efectos	28
2.2.1. Presencia de glifosato en alimentos	29
2.2.2. Toxicidad	29
2.3. Deriva	31
2.3.1. Tamaño de la gota	32
2.3.2. La aerodinámica	36
2.3.3. Diseño de boquillas	38
2.3.4. Métodos de aplicación	42
2.4. Condiciones en aplicaciones aéreas	45
2.4.1. Velocidad y dirección del viento	46
2.4.2. Temperatura	48
2.4.3. Humedad relativa	50
2.4.4. Inestabilidad atmosférica	55
3. Fumigación aérea en el Plan Colombia	57
3.1. Aspersión aérea	57

3.2.	Cultivos de coca y amapola	59
3.3.	Programa de monitoreo de cultivos ilícitos	61
3.4.	Zonas de cultivo de coca y amapola en Colombia	62
3.5.	Condiciones meteorológicas de la frontera	72
3.5.1.	Análisis climático	72
3.5.2.	Consideraciones meteorológicas para las fumigaciones	77
3.5.3.	Clima del departamento de Nariño.	78
3.5.4.	Clima del departamento de Putumayo	81
3.5.5.	Datos meteorológicos	81
3.5.6.	Estaciones cercanas a la zona de estudio	82
3.5.7.	Dataset ds461	82
3.5.8.	Dataset ds512.0	83
3.5.9.	Otras fuentes	85
4.	Modelo matemático	97
4.1.	Introducción	97
4.2.	La capa límite atmosférica	99
4.2.1.	Capa superficial atmosférica	101
4.3.	Turbulencia	102
4.3.1.	Turbulencia atmosférica	102
4.3.2.	El número de Reynolds	106
4.3.3.	La aproximación de Reynolds	108
4.3.4.	Las ecuaciones de Navier-Stokes	114
4.4.	Modelamiento de aspersiones aéreas	115
4.4.1.	Modelos para aspersiones cerca de la fuente	117
4.4.2.	Modelos para aspersiones lejos de la fuente	117
4.4.3.	Modelos Gaussianos	118
4.4.4.	Modelos Lagrangianos	121
4.5.	El modelo matemático	125
4.6.	Las ecuaciones que gobiernan el modelo	127
4.7.	Simulación numérica	132
4.7.1.	Dos dimensiones	133
4.7.2.	Tres dimensiones	165
4.7.3.	Interpretación de los resultados	171
5.	Conclusiones	173
5.1.	Conclusiones	173

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IX
5.2. Oportunidades de investigación	174
Bibliografía	175
Índice alfabético	188