

Meteorologische Daten

von

Cumaru - PE

2009-2012

Bruno Werner Kägi

Bern 2015

1. Einleitung

Cumaru ist eine Gemeinde im mittleren Agreste des brasilianischen Bundesstaats Pernambuco, etwa 90 km westlich der Südatlantikküste und nahe des 8. südlichen Breitengrads. Das Dorf liegt ungefähr 370 m über dem Meeresspiegel, inmitten einer Gruppe von Hügeln auf der Borborema-Hochebene. Hier steht die Sonne am 27. Februar und am 14. Oktober im Zenith. Das Klima ist charakterisiert durch eine Periode von sehr unregelmässig anfallenden Regen zwischen April und Juli und einer langen Trockenperiode zwischen August und März. Gemäss dem "Atlas pluviométrico do Brasil" (1948) sind April, Mai und Juni die niederschlagsreichsten Monate, Oktober, November und Dezember die niederschlagsärmsten Monate des Jahrs.

Für die einheimische Bevölkerung hat das Klima grosse Bedeutung: Die Regenmenge und -verteilung sind entscheidende Faktoren sowohl für den extensiven Ackerbau wie auch für die Weidewirtschaft. Viele Häuser im ländlichen Raum verfügen ausserdem über keine Wasserversorgung; diese Bewohner sind vollständig vom Wasser aus lokalen, vom Regen gespeisten Stauweihern und Zisternen abhängig.

In langen Trockenperioden herrscht im ländlichen Raum Wassermangel sowohl für Tier und Pflanzen wie auch für den Menschen. Die Unregelmässigkeit der Regen während der Regenzeit schädigt häufig das Kulturpflanzenwachstum. Schliesslich verursachen starke Niederschläge im Winter grosse Schäden an der Infrastruktur der Gemeinde, vor allem an den vielen unbefestigten und schlecht drainierten Naturstrassen. Angesichts der Unregelmässigkeit der Niederschläge im Winter besteht bei den Bauern grosse Unsicherheit darüber, wann gepflanzt werden soll. Mehrere Personen versicherten mir, dass früher die Bauern die Gewohnheit hatten, Mais und Bohnen kurz vor dem 21. März in die trockene Erde zu pflanzen, weil sie die Gewissheit hatten, dass die Regenzeit dann beginnen werde. Diese Leute beklagten sich, dass die Regenzeit heutzutage viel später beginne.

Ich bekam diese Probleme und Diskussionen im Gespräch mit Nachbarn und Freunden mit. Ausserdem wurde meine Neugierde durch mein eigenes Projekt geschürt, eine zweite Zisterne neben meinem Haus zu bauen, und ich wollte wissen, wie gross diese sein müsste. So begann ich also, einige meteorologischen Daten zu messen und aufzuschreiben. Leider wurde diese Arbeit nach gut dreieinhalb Jahren unterbrochen. Trotzdem ist es möglich, mit den gesammelten Daten einige interessante Schlussfolgerungen über das Klima von Cumaru zu ziehen.

Ich bedanke mich bei folgenden Personen für ihre Unterstützung: Paulo de Assis Nascimento, Fabio-Junior, José Andrade Lima, Leandro Agostinho Alves Costa, José Maximiano de Souza, Branquinho Maximiano de Souza und Rhuan de Cássio Silva Nascimento.

Falls Sie bei der Lektüre Vorschläge, Meinungen, Kommentare, Fragen und Ideen haben: Zögern Sie nicht, mir diese mitzuteilen! Schreiben Sie ein E-mail an: gotobrasil@gmx.ch

Dieser Bericht steht auf der Internet-Seite www.cumaru-pe.com.br zum Gratis-Download zur Verfügung.

2. Methode

Grundsätzlich wurden jeweils um 6 Uhr morgens die Regenmenge, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck gemessen. Für die Messung der Regenmenge wurde ein zylindrisches Gefäß von 11 cm Durchmesser auf einem Pfahl etwa 150 cm über Boden befestigt und mit einem Plastiktrichter bedeckt, der den Inhalt des Eimers vor Verdunstung während des Tags schützte. Die Lufttemperatur, der Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit wurden innerhalb meines Wohnhauses gemessen: Ein gut belüftetes Haus in der Nähe des Dorfzentrums von Cumaru, ca. 390 m über dem Meeresspiegel. Das Messgerät befand sich an einer Innenwand dieses Hauses, ca. 170 cm über dem Boden. Vom 1. Januar 2009 bis zum 31. August 2010 wurde eine analoge Messstation verwendet, vom 1. August 2010 an wurde dieses Gerät durch eine digitale Messstation namens "Meteoscan" der Marke VION (www.vion-marine.com) ersetzt, die eine genauere Datenerhebung erlaubte.

Während der Messzeit sind mehrere Vorkommnisse geschehen: Wenn ich auf Reisen war, rief ich jeweils einen Helfer, um an meiner Stelle die Daten zu notieren. Einige dieser Daten waren schlecht leserlich oder wenig vertrauenswürdig und wurden daher nicht für die Auswertung verwendet. Zweimal ist der 12 cm tiefe Wassersammelbehälter innert der Messperiode von 24 Stunden übergelaufen. Als ich die analoge Messstation durch eine digitale ersetzte, erhob ich die Daten während einem Monat auf beiden Geräten. Dabei stellte ich systematische Fehler bei der Messung des Luftdrucks von -15.3 hPa und der Luftfeuchtigkeit von +18.6% fest. Die in diesem Bericht verwendeten analogen Daten (jene vor dem 1. August 2010) sind in diesem Sinn korrigiert worden, um einen einwandfreien Vergleich aller Daten untereinander zu erlauben.

Um die bisherige Messmethode verbessern zu können und um den Verlauf der Messparameter während des Tages kennenzulernen, wurden Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit von Stunde zu Stunde während einiger Tage der Jahre 2011 und 2012 gemessen.

In diesem Bericht werden nur die repräsentativsten Daten in Form von Tabellen und Grafiken dargestellt. Die Originaldaten sind aus den jeweiligen Jahresberichten ersichtlich.

In den Grafiken 8 (Seite 13) und 12 (Seite 22) sind die morgendliche Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Regenmenge und der Luftdruck dargestellt. Um den Verlauf und die gegenseitige Abhängigkeit dieser Parameter von Tag zu Tag vergleichen zu können, sind sie in denselben Grafiken zusammengefasst. Die y-Achse ist dabei absichtlich weggelassen worden, weil es hier nicht auf die absoluten Werte, sondern auf die gegenseitige Abhängigkeit ihrer Veränderungen ankommt. Die y-Achse der einzelnen Parameter ist folgendermassen angepasst worden:

Tabelle 1: Umrechnung der y-Achse in den Grafiken 8 (Seite 13) und 12 (Seite 22):

Wert in der Grafik	Morgendliche Temperatur	Morgendlicher Luftdruck	Morgendliche Luftfeuchtigkeit	Regenmenge am Vortag
5	25° C	961 hPa	90 %	50 mm
4	24° C	959 hPa	80 %	40 mm
3	23° C	957 hPa	70 %	30 mm
2	22° C	955 hPa	60 %	20 mm
1	21° C	953 hPa	50 %	10 mm
0	20° C	951 hPa	40 %	0 mm
Formel	$x-20$	$(x-951):2$	$(x-40):10$	$X:10$

Kritik an der Methode: Der tägliche Messzeitpunkt um 6 Uhr ist als praktikabler Kompromiss grundsätzlich richtig gewählt worden, aber noch besser wäre es, die Daten zum jeweiligen genauen Zeitpunkt des Sonnenaufgangs zu erheben, welcher je nach Jahreszeit etwas anders ist. Diese Ungenauigkeit verfälscht leicht die Resultate der Tagesgänge. Die Messung des Luftdrucks würde besser zum Zeitpunkt des jeweils tiefsten Tageswerts erfolgen, d.h. um etwa 3 Uhr oder 15 Uhr, bzw. zum jeweiligen Zeitpunkt des höchsten Werts, ca. um 9 Uhr. Angesichts der häufigen Unregelmässigkeiten wäre es nützlich, die Daten über einen längeren Zeitraum zu erheben, als dies gemacht wurde. Es wäre auch nützlich, zusätzlich den Bewölkungsgrad bzw. die Besonnung, die Windrichtung und die Windstärke im Tagesverlauf zu messen. Noch aufschlussreicher wäre es jedoch, den Untersuchungsperimeter zu vergrössern. Ich bin z.B. davon überzeugt, dass die erhobenen Daten stark mit der Regenmenge im Osten von Cumarú und mit der Meerestemperatur zusammenhängen.

3. Resultate

3.1. Jahresmittel der erhobenen klimatischen Messgrößen

Die Daten wurden während drei Jahren und 8 Monaten erhoben. Die mittlere frühmorgendliche Lufttemperatur, die gleichzeitig meist auch der tiefsten Tagestemperatur entspricht, betrug in Cumaru 22.70° C, die jährliche Standardabweichung der Temperatur schwankte zwischen 1.3° C und 1.7° C. Die frühmorgendliche relative Luftfeuchtigkeit betrug im Durchschnitt 78.87 %, mit einer jährlichen Standardabweichung von 3.3-7.3%. Der mittlere morgendliche Luftdruck betrug 957.75 hPa, mit einer jährlichen Standardabweichung von 1.3-3.2 hPa. Gross waren jedoch die Schwankungen der jährlichen Regenmengen. Im Mittel betrug sie 1013 mm, der Unterschied zwischen der kleinsten und der grössten jährlichen Regenmenge betrug ganze 1001 mm.

Tabelle 2: Jährliche Mittelwerte und Standardabweichungen von morgendlicher Temperatur, morgendlichem Luftdruck, morgendlicher relativer Luftfeuchtigkeit und Regenmengen:

Periode	Dauer [Tage]	Mittelwert morgendl. Temperatur [°C]	Standardabweichung morgendliche Temperatur [°C]	Mittelwert morgendl. Luftdruck [hPa]	Standardabweichung morgendl. Luftdruck [hPa]	Mittelwert morgendl. Luftfeuchtigkeit [%]	Standardabweichung Morgendl. Luftfeuchtigkeit [%]	Regenmenge [mm]	Standardabweichung Regenmenge [mm]
2009	365	23.12	1.555	959.60	3.176	76.35	7.30	916.0	0.912
2010	365	23.29	1.709	958.32	2.386	77.67	5.08	858.3	1.552
2011	365	22.34	1.498	956.92	2.072	82.08	3.47	1633.7	1.913
2012	243	22.10	1.291	952.15	1.268	80.35	3.33	534.4	0.787
2012 ¹	365 ¹	22.03 ¹		956.15 ¹		79.39 ¹		633.8 ¹	
Ø 2009-2012 ¹	1460 ¹	22.70 ¹		957.75 ¹		78.87 ¹		1010.5 ¹	

3.2. Monatsmittel der frühmorgendlichen Luftfeuchtigkeit

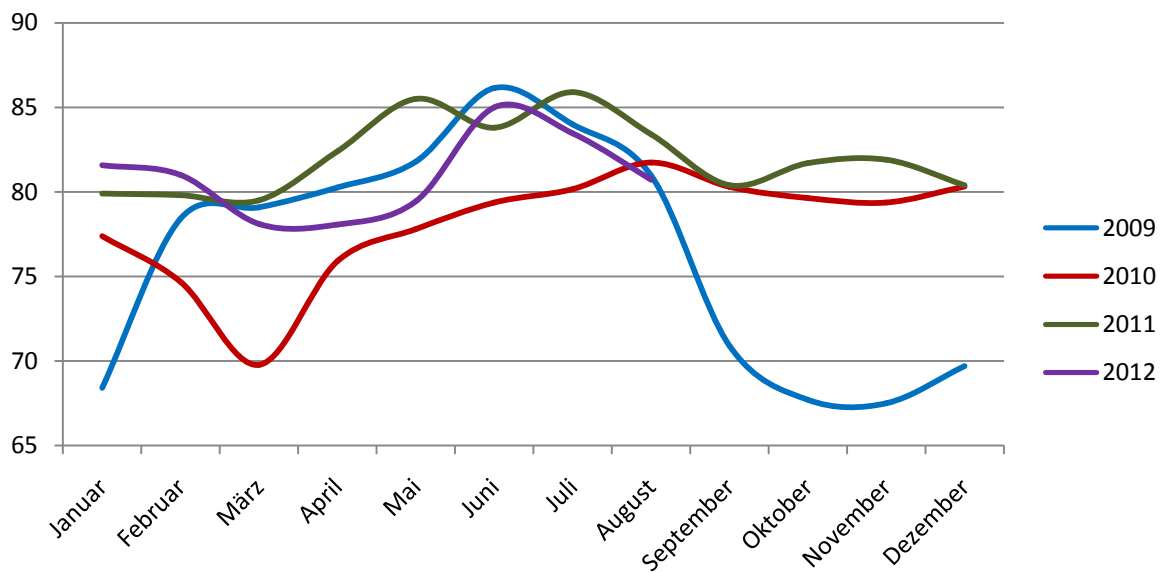
Die Werte können zwischen dem Monat eines Jahrs und dem gleichen Monat eines anderen Jahrs stark variieren. Grundsätzlich besteht eine starke Korrelation zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Regenmenge des gleichen Monats. In den Jahren 2009 und 2011 z.B. gleichen die Grafiken der Monatsmittel der Luftfeuchtigkeit (Grafik 1, Seite 6) stark den Grafiken der monatlichen Regenmengen (Grafik 5, Seite 10), woraus wir schliessen können, dass die Luftfeuchtigkeit parallel mit der Regenmenge steigt oder fällt. Aus den Monatsmittelwerten ist nicht erkennbar, ob die Zunahme der Luftfeuchtigkeit Folge oder Ursache der Regenereignisse sind.

Die grössten Zunahmen der Luftfeuchtigkeit konnten zu Beginn der Regenzeiten der Jahre 2010 und 2012 festgestellt werden. Im Jahr 2010 folgte dem trockenen März eine Periode mit viel Regen, der die Luftfeuchtigkeit erhöhte. Die stärkste Abnahme der Luftfeuchtigkeit erfolgte vom August bis zum Oktober 2009.

Es existieren jedoch Entwicklungen der monatlichen Mittelwerte der Luftfeuchtigkeit, die nicht mit der monatlichen Regenmenge erklärbar sind. Während einiger Monate weicht die Luftfeuchtigkeit stark von der Regenmenge ab. Es handelt sich um die Monate Januar, Februar, Juni, Juli und August 2010. Dieses Phänomen kann damit erklärt werden, dass die relative Luftfeuchtigkeit nicht nur von der Regenmenge abhängig ist. Hohe Temperaturen zum Beispiel vermindern die relative Luftfeuchtigkeit, und ein Übermass an Regen innert kurzer Zeit erhöht eine bereits hohe relative Luftfeuchtigkeit nicht mehr, weil ein Grossteil dieses Wassers nicht verdunstet, sondern nach Wassersättigung des Bodens über Bäche und Flüsse abfließt. Eine detailliertere Beziehung zwischen der Luftfeuchtigkeit und den übrigen Messparametern wird in Kapitel 3.9 (Seite 12) erklärt.

¹ Die zwischen Januar und August 2012 verfügbaren Zahlen wurden für das verbleibende Jahr extrapoliert.

Grafik 1: Monatsmittelwerte der frühmorgendlichen relativen Luftfeuchtigkeit [in %]



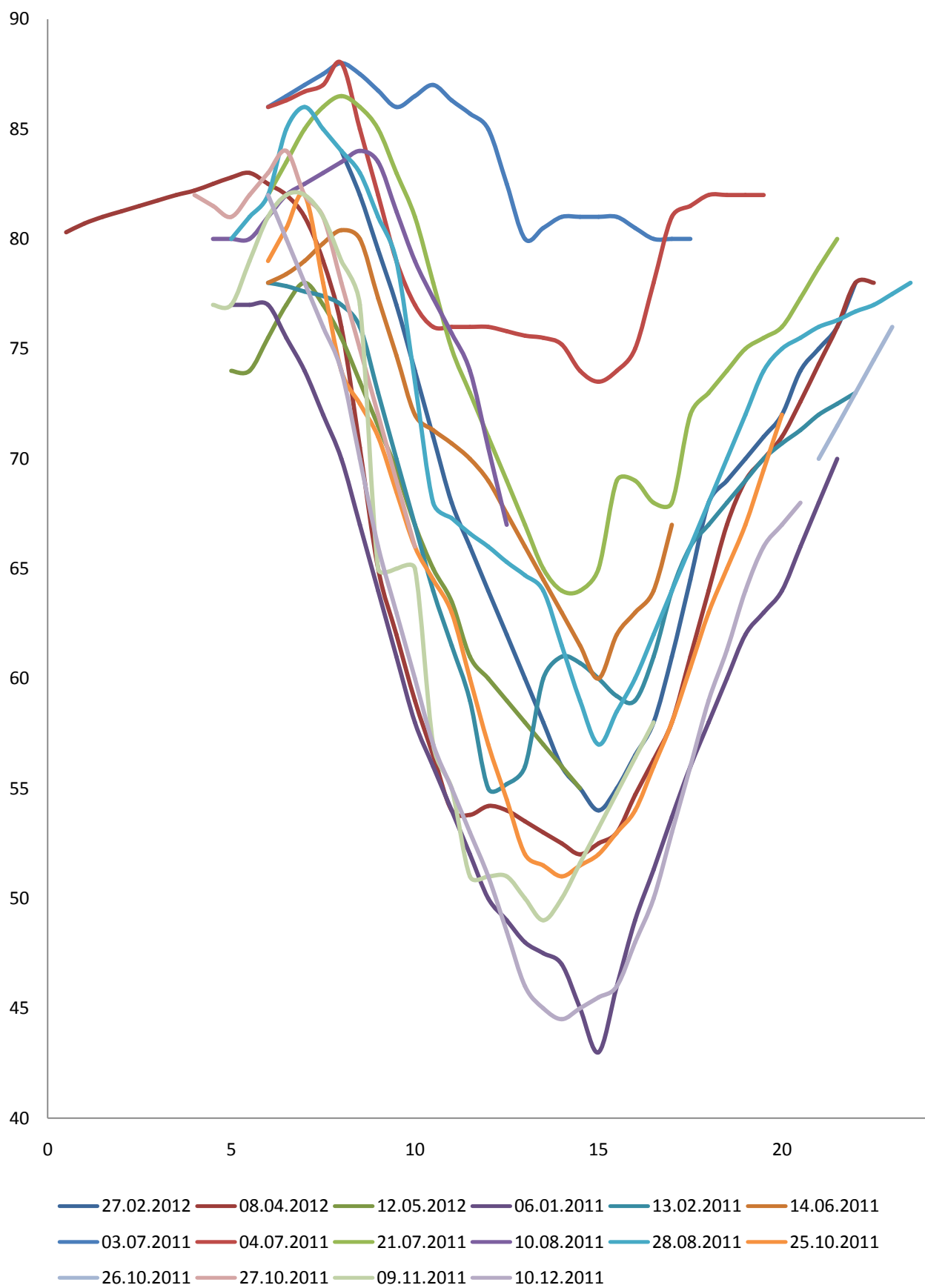
3.3. Tagesverlauf der relativen Luftfeuchtigkeit

Im Verlauf des Tages verändert sich die relative Luftfeuchtigkeit viel stärker als die Jahresmittelwerte der morgendlichen Luftfeuchtigkeit. Im Verlauf des Jahres schwankt die Luftfeuchtigkeit um ca. 15%, aber während eines einzigen Sommertags kann die Luftfeuchtigkeit um bis zu 35 % abnehmen! Diese Schwankungen sind hauptsächlich die Folge der Temperaturschwankungen: Bei gleichbleibender absoluter Luftfeuchtigkeit nimmt die relative Luftfeuchtigkeit mit steigender Temperatur ab. Die Grafiken des Tagesverlaufs der Luftfeuchtigkeit (Grafik 2, Seite 7) und diejenige des Temperaturverlaufs (Grafik 4, Seite 9) sind denn auch praktisch invers.

Generell erreicht die relative Luftfeuchtigkeit ihren höchsten Tageswert zwischen 5 und 6 Uhr morgens, also genau dann, wenn die Temperatur ihren tiefsten Wert erreicht. Die Höhe dieses Werts hängt hauptsächlich von der Regenmenge der vorangegangenen Tage ab. In den darauf folgenden Stunden fällt die Feuchtigkeit auf den tiefsten Wert des Tages ab, bis ca. 15 Uhr, also kurz nachdem die höchste Tagestemperatur erreicht worden ist. Von da an steigt die relative Luftfeuchtigkeit wieder an; bis ca. 20 Uhr mit gleicher Geschwindigkeit, wie sie vormittags gesunken war, danach etwas langsamer, bis sie vor Sonnenaufgang wiederum den höchsten Wert des nächsten Tags erreicht. In der Regenzeit sinkt die Luftfeuchtigkeit im Verlauf des Tags viel weniger als in der Trockenzeit. An einem regnerischen Tag kann es gar vorkommen, dass die morgendliche relative Luftfeuchtigkeit während des ganzen Tages den gleichen Wert beibehält.

Der in der gesamten Untersuchungszeit höchste Wert der relativen Feuchtigkeit wurde mit 91 % am 3. März 2011 um 16.15 Uhr gemessen. Während der fünf vorangegangenen Tage hatte es viel geregnet (219 mm), am Messtag selber eine Rekord-Menge von 100 mm. An diesem Tag stieg die Temperatur nicht höher als bis 24 ° C. Ein anderer Tag mit einer hohen Luftfeuchtigkeit war der 12. Juli 2011: Nach über zwei regnerischen Wochen erreichte die Luftfeuchtigkeit um 6 Uhr morgens den hohen Wert von 90 %. Diese hohe Luftfeuchtigkeit blieb bis 11.40 Uhr erhalten und fiel am Nachmittag nur bis 86 %. Die tiefste Luftfeuchtigkeit wurde mit 43 % im Sommer gemessen, und zwar am 6. Januar 2011 um 15 Uhr, zum Zeitpunkt der höchsten Tagestemperatur (30.5° C), nach zwanzig regenfreien Tagen.

Grafik 2: Relative Luftfeuchtigkeit im Verlauf einiger ausgewählter Tage

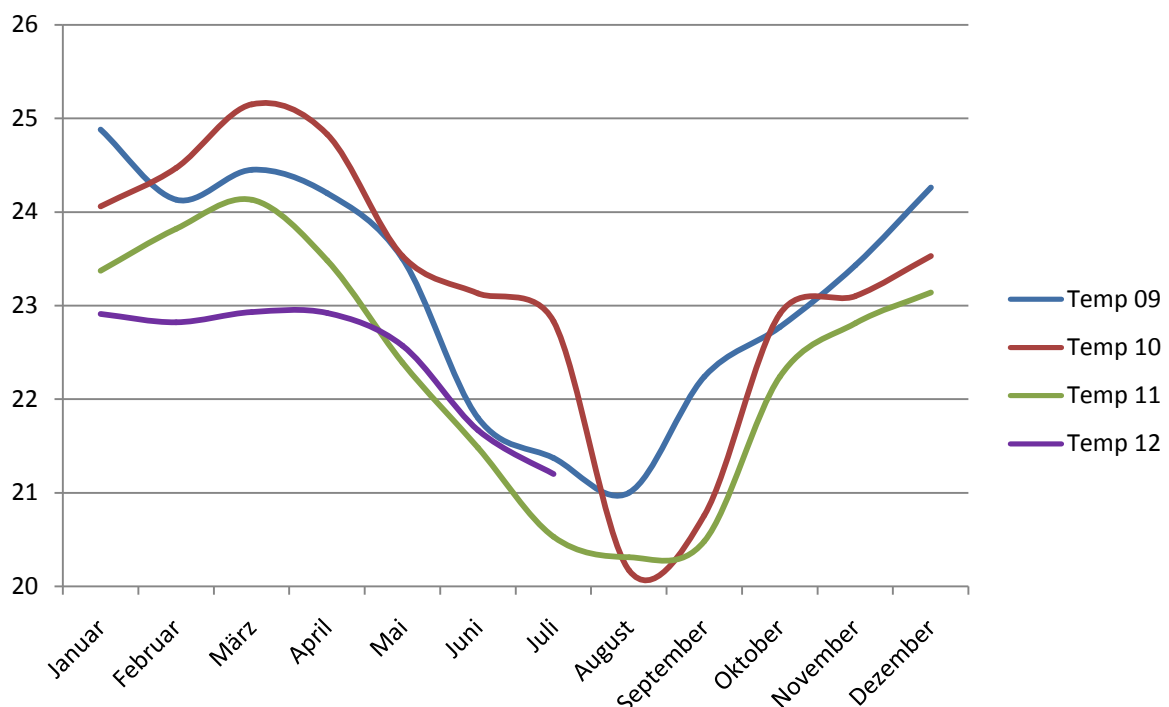


Hin und wieder erleidet der übliche Tagesverlauf Unregelmässigkeiten: Vor allem während der Regenzeit wird das morgendliche Absinken der Luftfeuchtigkeit von einem Anstieg während einiger Minuten oder während einer oder zwei Stunden unterbrochen, um danach wieder weiterzusinken. Dies geschah zum Beispiel am 5. und 6. Januar 2009, am 13. Februar und am 3., 4. und 21. Juli 2011. Diese Abweichungen können mit der Ankunft von Wolken oder feuchter Luftmassen erklärt werden.

3.4. Monatsmittelwerte der frühmorgendlichen Lufttemperatur

Die Mittelwerte der morgendlichen Temperatur widerspiegeln vor allem die Energiemenge ab, die die Erde erreicht und die in der Erde und Vegetation während der Nacht gespeichert werden kann. Der Energieeintrag hängt im wesentlichen vom Sonnenstand und dem Bewölkungsgrad ab. Um die Grafik 3 (Seite 8) erklären zu können, müssen wir berücksichtigen, dass die Wolken der Regenzeit, die Feuchtigkeit von Boden und Vegetation Faktoren sind, die die alltägliche Erwärmung verlangsamen. Die Sonne steht in Cumarú am 27. Februar und am 14. Oktober im Zenith, der tiefste Sonnenstand wird am 21. Juni erreicht. Über die ganze Untersuchungszeit hinweg wurde der tiefste monatliche Mittelwert der morgendlichen Temperatur im August gemessen, also zwei Monate nach dem Tag der geringsten Sonneneinstrahlung. Der höchste Wert wurde in den Jahren 2010-2012 jeweils im März erreicht, also einen Monat nach dem Tag der theoretisch höchsten Sonneneinstrahlung des Jahrs. Die Temperaturdifferenz zwischen Regenzeit und Trockenzeit beträgt ca. 4-5° C. Der grösste Temperatursprung zwischen Trockenzeit und Regenzeit wurde im Jahr 2010 erreicht: Vom März bis August fiel der Monatsmittelwert der morgendlichen Lufttemperatur von 25.15° C auf 20.17° C, also um 5° C in fünf Monaten.

Grafik 3: Monatsmittelwerte der frühmorgendlichen Lufttemperatur [in °C]



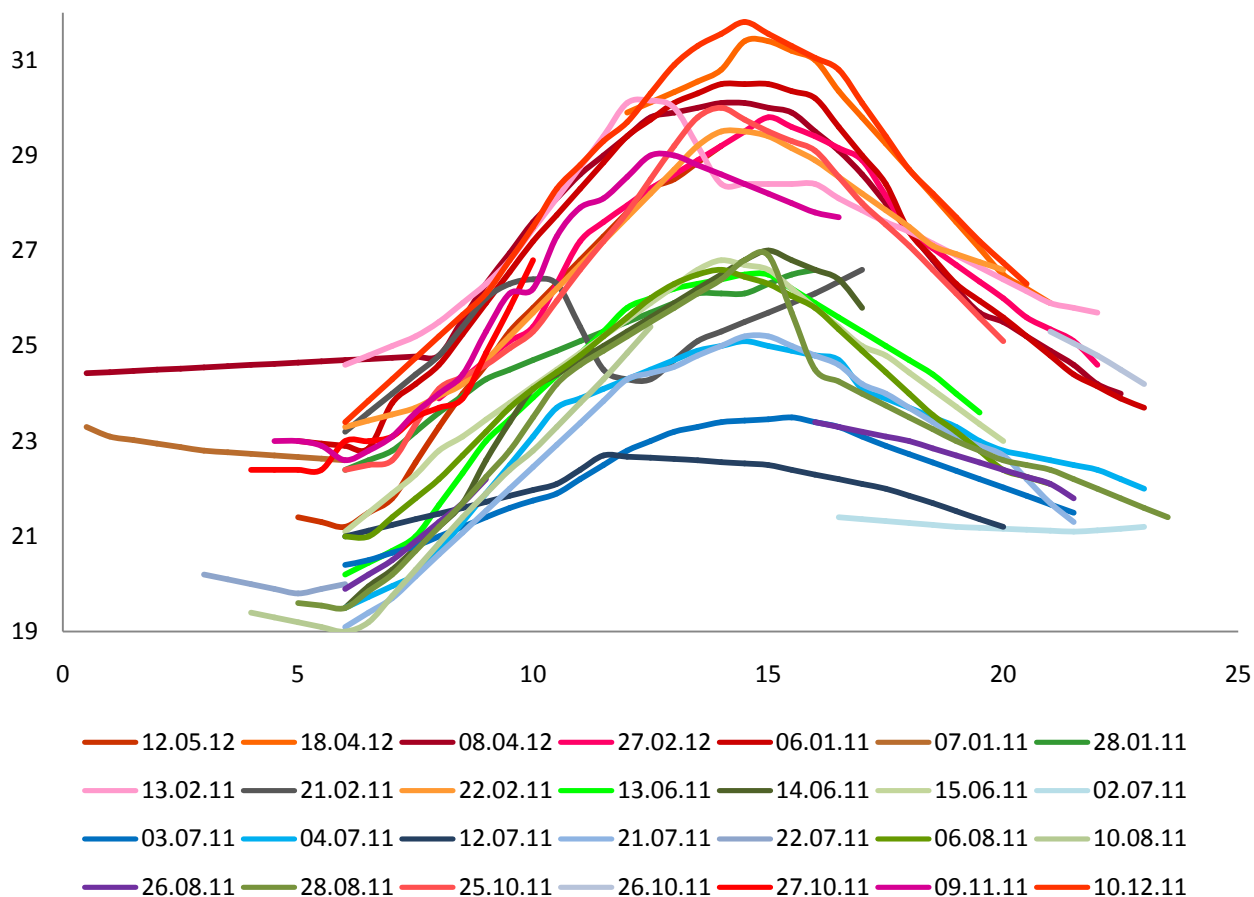
3.5. Tagesverlauf der Lufttemperatur

Die Lufttemperatur hat einen sehr charakteristischen Verlauf während des Tags: Vor dem Sonnenaufgang, etwa um 6 Uhr, herrscht die tiefste Temperatur des Tages. In der Trockenzeit beträgt diese um die 23° C, in der Regenzeit etwa 3° C weniger. Die tiefste gemessene Temperatur betrug 18.6° C, und zwar am 15. August 2010 um 6 Uhr morgens. Da es während den vorangegangenen sechs Tagen nicht geregnet hatte, können wir vermuten, dass der Himmel nachts nicht bedeckt war, womit die tiefe Temperatur gut erklärbar ist. Ab dem Sonnenaufgang steigt die Temperatur fast linear bis zur höchsten Tagestemperatur an. Dieser Temperaturanstieg beträgt in der Trockenzeit etwa 9° C, in der Regenzeit ca. 6° C. Während der Trockenzeit wird die höchste Temperatur des Tages zwischen 14 und 15 Uhr erreicht. Die höchste gemessene Temperatur betrug 35° C, und zwar am 7. März 2010 um 15.30 Uhr. An diesem Tag hatte die Temperatur vor dem Sonnenaufgang bereits 25° C betragen. Es war ein regenfreier Tag, aber es hatte an den zwei vorangegangenen Tagen geregnet. Während der Regenzeit sind die Temperaturen generell tiefer, und die Tageshöchsttemperatur wird etwas früher erreicht als während der Trockenzeit.

Von diesem Moment an sinkt die Temperatur wieder bis zur tiefsten Temperatur des folgenden Tags vor Sonnenaufgang. Dieser Temperaturrückgang ist vor Mitternacht weitaus stärker als nach Mitternacht.

Die Temperaturen folgen diesem Muster während der meisten Tage des Jahres. Der Verlauf wird jedoch durch Regen und Wolken beeinflusst. Durch Bewölkung während des Tags und Regen wird die Temperatur gesenkt, Bewölkung während der Nacht erhöht die Temperatur. Am 21. Februar 2011 bewirkte beispielsweise ein vormittäglicher Regen einen Temperaturrückgang von 2° C während zwei Stunden, und in der bewölkten Nacht vom 8. April 2012 nahm die Lufttemperatur zu anstatt ab.

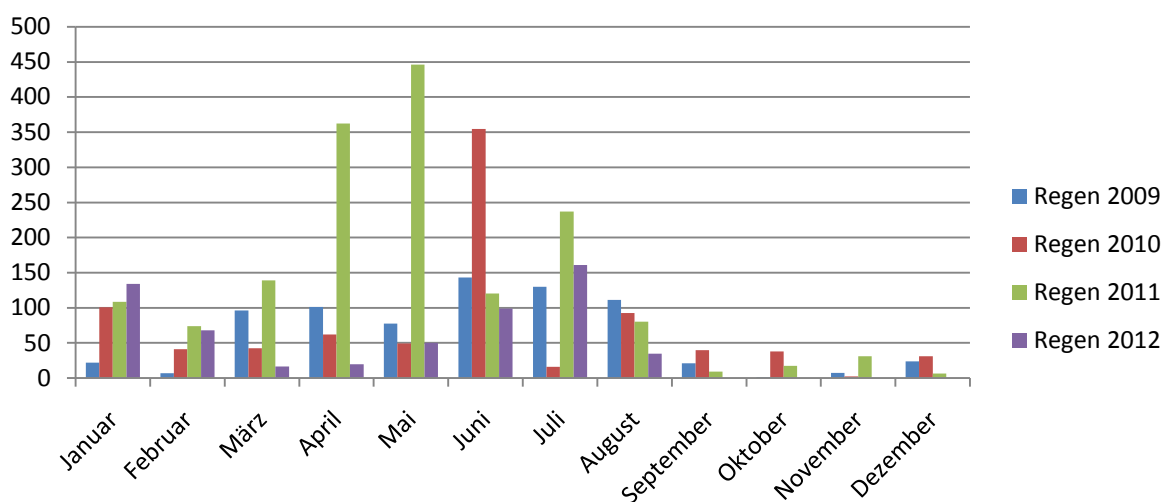
Grafik 4: Verlauf der Lufttemperatur an einigen ausgewählten Tagen [°C]



3.6. Monatliche Regenmenge

In Cumaru variiert die Regenmenge von einem Jahr zum anderen sehr stark. Im Jahr 2009 fielen 916 mm, im Folgejahr 858 mm, im Jahr 2011 waren es 1'633.7 mm. Die trockensten Monate des Jahres sind September, Oktober, November und Dezember, die regenreichsten Monate Mai, Juni und Juli. Der Januar weist ebenfalls eine kleine Regenzeit auf. Die monatliche Regenmenge variiert auch stark im gleichen Monat verschiedener Jahre: Im Monat Mai 2011 zum Beispiel fiel neunmal die Regenmenge des gleichen Monats der Jahre 2010 und 2012. In der Regel fällt ein grosser Teil der Regenmenge in wenigen Tagen: In vier Tagen des Monats Mai 2011 regnete es 81% der gesamten Monatsregenmenge oder 22% der Jahresregenmenge, und innert drei Tagen des Monats Juni 2010 fielen 31% der gesamten Jahresregenmenge. Der trockenste Monat der Messperiode war der Oktober 2009 mit einer Monatsregenmenge von nur 1.5 mm. Wenn man tägliche Regenmengen von unter 1 mm nicht berücksichtigt, dauerte die längste regenlose Periode 48 Tage. Sie begann am 26. September 2009 und dauerte bis zum 12. November 2009.

Grafik 5: Monatliche Regenmenge [mm]



Mit der höchsten Niederschlagsmenge in den Monaten Mai bis Juli gleicht das Klima von Cumaru demjenigen der Küstenregion von Pernambuco (Gruppe 7b, Seite 21 des Atlas pluviométrico do Brasil) und unterscheidet sich deutlich vom Klima des Sertão, wo die höchste Niederschlagsmenge zwischen Januar und April gemessen wird. Gemäss Lyra et al. 2014 kann grundsätzlich zwischen Trockenzeit, Regenzeit und einer Übergangszeit unterschieden werden. Letztere verlängert sich in der Regel mit zunehmender Distanz des Ortes vom Meeresufer. In Cumaru besteht gemäss der Definition von Lyra et al. 2014 die Trockenzeit aus den Monaten September bis Dezember, die Übergangszeit aus den Monaten Januar bis Mai und die Regenzeit aus den Monaten Juni bis August.

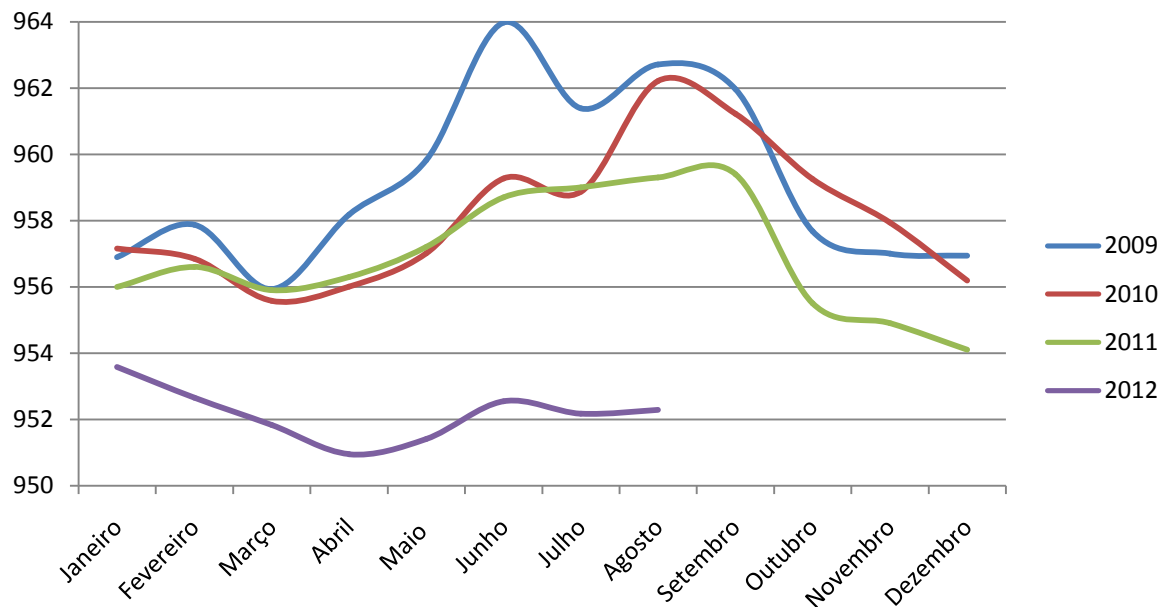
3.7. Monatsmittel des frühmorgendlichen Luftdrucks

Grundsätzlich ist der frühmorgendliche Luftdruck während der Regenzeit hoch, ausserdem gibt es ein relatives Hoch im Monat Januar oder Februar. Während den trockensten Monaten des Jahrs ist der Luftdruck am tiefsten. Die höchsten Mittelwerte wurden in den Monaten Juni und August gemessen.

In den Monaten Juli der Jahre 2009 und 2010 fiel der Luftdruck ohne offensichtlichen Grund. Mit den erhobenen Daten ebenfalls nicht erklärbar sind die hohen Luftdrücke in den Monaten Februar der

Jahr 2009 und 2011. Ein weiteres unerklärbares Phänomen ist ausserdem der insgesamt tiefe Luftdruck im Jahr 2012. Es existiert nur eine schwache Korrelation zwischen dem Verlauf der Luftdruck-Monatsmittelwerte und den monatlichen Regenmengen. Mit den erhobenen Daten können wir demnach nicht darauf schliessen, dass ein hoher Luftdruck eine hohe Regenmenge zur Folge hat.

Grafik 6: Monatsmittel des frühmorgendlichen Luftdrucks [hPa]



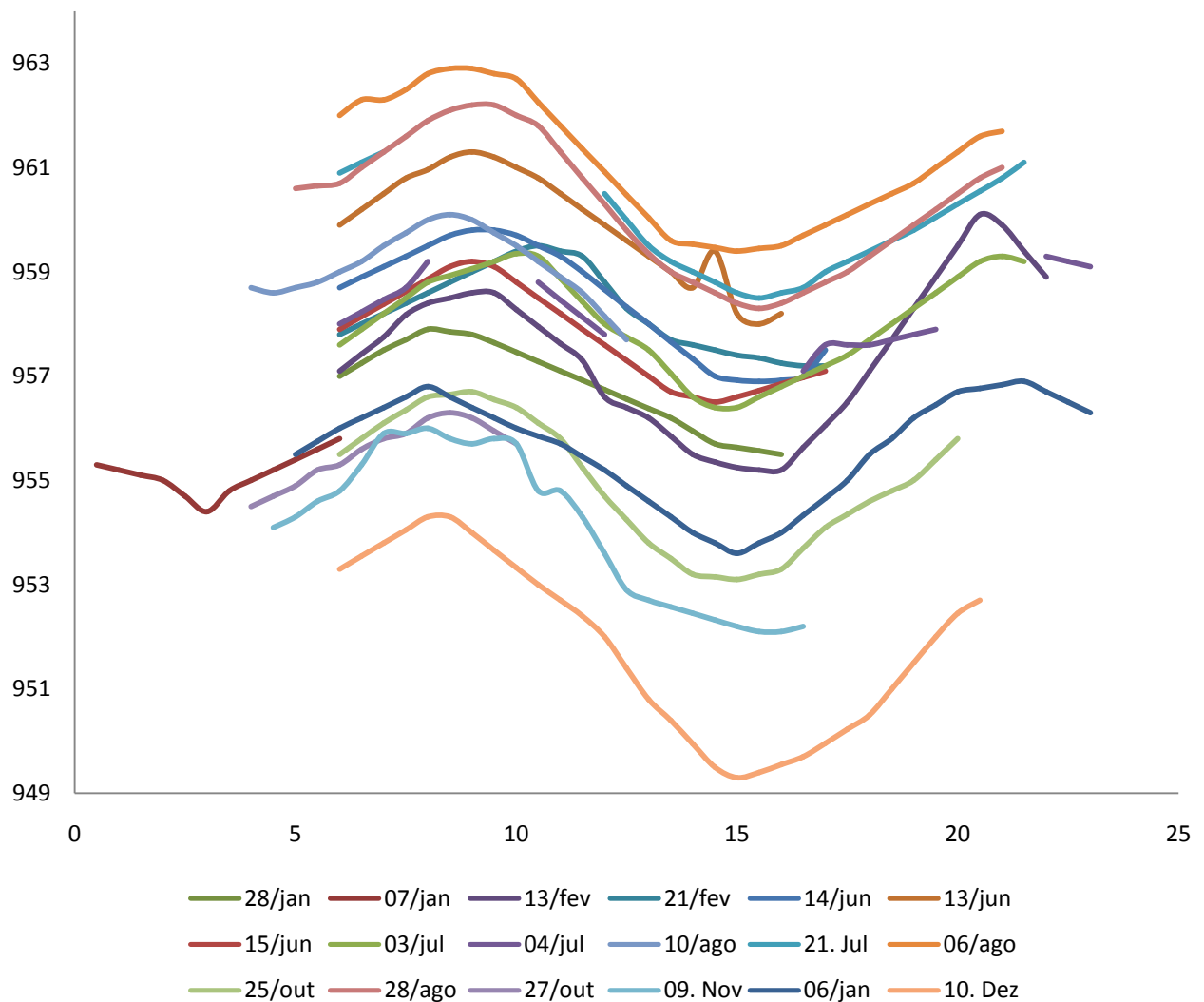
3.8. Tagesverlauf des Luftdrucks

Während des Tages erleidet der Luftdruck einen interessanten, sehr regelmässigen Verlauf, der anscheinend unabhängig von allen übrigen Parametern ist. Die Grafik 7 (Seite 12) zeigt je zwei Phasen von hohem und tiefem Luftdruck während 24 Stunden, die sich gegenseitig abwechseln. Die erste Hochdruckphase erfolgt ungefähr um 8.30 – 9 Uhr, die zweite 12 Stunden später, nämlich um ca. 21 Uhr. Zwischen diesen Hochdruckphasen fällt der Luftdruck regelmässig um ca. 3-5 hPa. Diese Druckdifferenz ist weit grösser als in der Literatur beschrieben. Gemäss Dai 1999 sind die grössten täglichen Druckschwankungen mit ca. 1.3 hPa angegeben (Seite 3879).

Der höchste Luftdruckwert, 962.9 hPa, wurde am 6. August 2011 um 9 Uhr gemessen, der tiefste Wert, 949.3 hPa, am 10. Dezember 2011 um 14.37 Uhr.

An dieser Stelle sei noch ein weiteres Phänomen im Zusammenhang mit dem Luftdruck beschrieben: Während meiner Reisen bat ich jeweils einen Freund, für mich allmorgendlich die Wetterdaten zu notieren. Einmal entschloss sich einer meiner Helfer, die Wetterstation zu sich nach Hause zu nehmen. Während mein Haus an einem nordostexponierten flachen Hang auf 390 m über Meer steht, befindet sich seines ca. 400 m Luftlinie nordöstlich davon, an einem eher steilen südexponierten Hang, ca. 420 m über Meer. Obwohl sich die beiden Orte in der gleichen Geländekammer befinden und sich in der Meereshöhe nur unwesentlich voneinander unterscheiden, mass ich mehrmals einen Druckabfall von meinem Haus zum Haus des Helfers von ganzen 3.5 hPa. Ich vermute, dass die unterschiedliche Exposition und die unterschiedlichen Windverhältnisse Ursache für den grossen Druckunterschied ist. Selbstverständlich korrigierte ich im Nachhinein die von ihm notierten Luftdruckzahlen.

Grafik 7: Verlauf des Luftdrucks während einiger ausgewählter Tage



3.9. Zusammenhang zwischen einzelnen Regenereignissen, dem Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit

Die Grafik 8 (Seite 13) zeigt den Verlauf der meteorologischen Parameter innerhalb des Jahrs. Anhand dieser Grafik können wir Beginn und Dauer der Regen- und Trockenzeiten feststellen, ausserdem die Zunahmen und Abnahmen von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck in grösseren Zeitperioden.

Der Beginn der Regenzeiten scheint mit einer Erhöhung des Luftdrucks und einer Erniedrigung der Lufttemperatur zusammenzufallen. Dieser Zusammenhang ist schon aus den Grafiken 3 (Seite 8), 5 (Seite 10) und 6 (Seite 11) ersichtlich, erscheint aber noch deutlicher in Grafik 8. Je höher die schwarze Linie des Luftdrucks und je tiefer die rote Linie der Temperatur, desto regelmässiger ist die Regenmenge. Während der Perioden, in denen die Temperaturkurve unterhalb der Luftdruckkurve liegt, sind tägliche Regenereignisse die Regel. Daraus kann geschlossen werden, dass die Regenzeit in Cumaru nicht direkt durch die innertropische Konvergenzzone ausgelöst wird, weil die Regenfälle innerhalb der innertropischen Konvergenzzone von einer Druckreduktion begleitet sein müsste.

Die Regenzeit dauerte im Jahr 2009 vom 21. Mai bis 15. September, im Jahr 2010 vom 4. Juni bis 27. September, im Jahr 2011 vom 7. April bis 3. September, im Jahr 2012 begann sie am 24. Mai. Die Temperaturstürze und Luftdruckerhöhungen erfolgten zu folgenden Zeitpunkten:

Tabelle 3: Zeitpunkt der Temperaturstürze und Luftdruckerhöhungen bezüglich dem Beginn der Regenzeit:

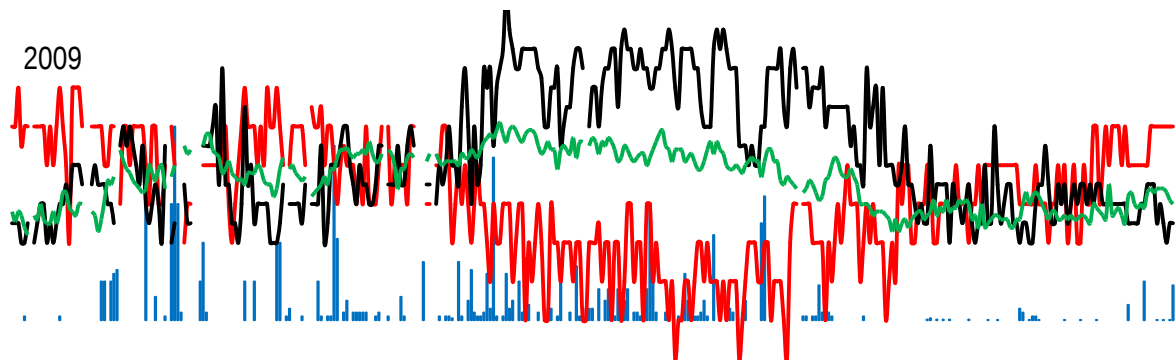
<u>Jahr</u>	<u>Zeitpunkt des Temperatursturzes bezüglich dem Beginn der Regenzeit</u>	<u>Zeitpunkt der Druckerhöhung bezüglich dem Beginn der Regenzeit</u>
2009	- 2Tage	+ 2 Tage
2010	+ 5 Tage	- 1 Tag
2011	+ 7 Tage	+ 42 Tage
2012	- 4 Tage	+ 29 Tage

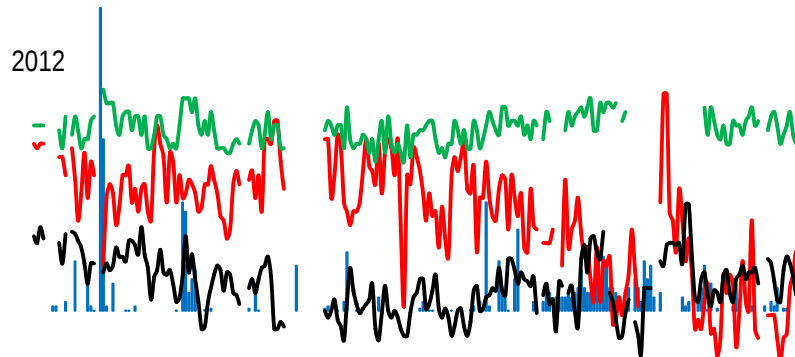
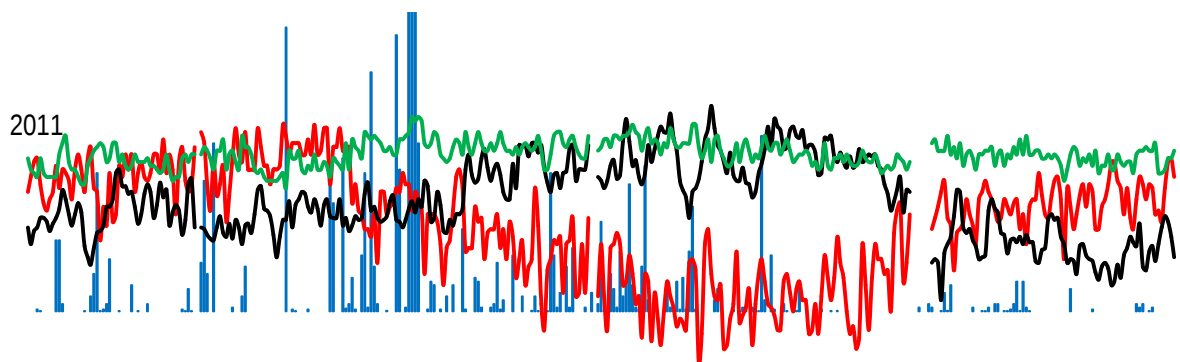
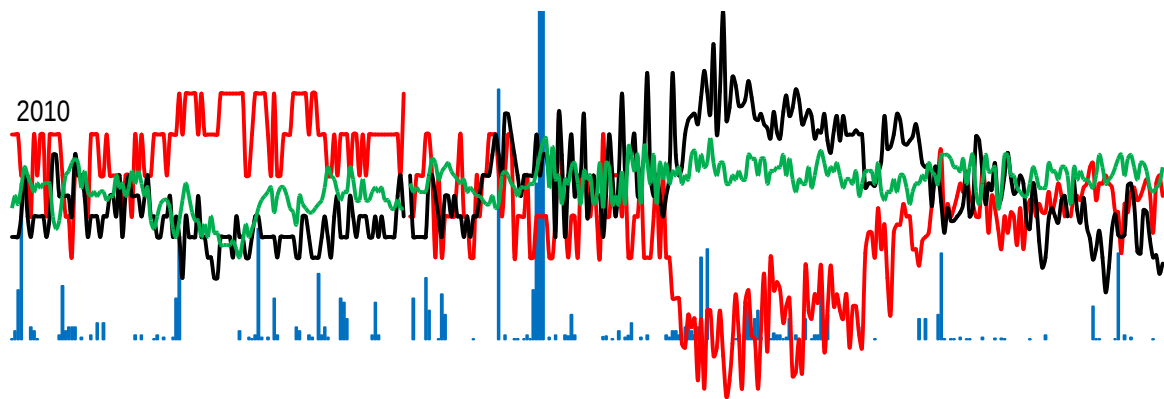
Für die folgende Tabelle 4 wurden die Mittelwerte der Temperatur und des Luftdrucks der dem Beginn der Regenzeit vorangegangenen 10 respektive 20 Tage mit denjenigen dem Beginn der Regenzeit nachgefolgten Tage miteinander verglichen. Es ergibt sich, dass die dem Regenbeginn nachfolgenden 10 Tage im Durchschnitt 0.53°C kälter waren als die dem Regenbeginn vorangegangenen 10 Tage. Der Luftdruck stieg von den 10 dem Regenbeginn vorangegangenen Tagen bis zu den dem Regenbeginn nachfolgenden 10 Tagen im Mittel um 1.53 hPa an.

Tabelle 4: Differenzen der Mittelwerte von frühmorgendlicher Temperatur und frühmorgendlichem Luftdruck der dem Beginn der Regenzeit vorangegangenen und nachfolgenden Tage:

<u>Jahr</u>	<u>Temperatur</u> <u>10 Tage</u>	<u>Temperatur</u> <u>20 Tage</u>	<u>Luftdruck</u> <u>10 Tage</u>	<u>Luftdruck</u> <u>20 Tage</u>
2009	- 0.8°C	- 1.265°C	+ 2.6334 hPa	+ 3.791 hPa
2010	- 0.3°C	- 0.25°C	+ 1.5 hPa	+ 1.95 hPa
2011	- 0.66°C	- 1.165°C	+ 0.79 hPa	+ 0.04 hPa
2012	- 0.36°C	- 0.3787°C	+ 1.42 hPa	+ 1.168 hPa
Ø der 4 Jahre	- 0.53°C	- 0.765°C	+ 1.586 hPa	+ 1.737 hPa

Grafik 8: Morgendliche Temperatur (rot), Luftdruck (schwarz), Luftfeuchtigkeit (grün) und tägliche Regenmenge (blau)





Des weiteren kann beobachtet werden, dass vor sommerlichen Regenereignissen sowohl Luftdruck wie auch die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur sinken. In der Tabelle 5 (Seite 16) sind sämtliche wesentlichen sommerlichen Regenfälle und Luftdruckabsenkungen dargestellt, zusammen mit den zugehörigen Erniedrigungen der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Werte, die die obgenannte These stützen, sind gelb unterlegt, diejenigen Werte, die der These widersprechen, sind rot hinterlegt.

Der Tabelle 5 (Seite 16) kann man entnehmen, dass es innert 44 Monaten 66 Situationen gab, in denen es entweder tatsächlich sommerliche Regenereignisse gab oder zumindest Druckverhältnisse herrschten, die auf sommerliche Regenereignisse hindeuteten. 58 dieser Situationen führten tatsächlich zu Regenereignissen. Vor nur 6 sommerlichen Regenereignissen konnte kein Abfall des Luftdrucks festgestellt werden, in allen anderen Fällen fiel der Luftdruck vor sommerlichen Regenereignissen deutlich. Im Durchschnitt begann er 3.57 Tage vor Beginn des Regens zu fallen und stieg erst kurz nach

Beginn des Regenereignisses wieder an. Dies bedeutete einen mittleren Druckabfall von 2.736 hPa innert 3.33 Tagen. In den 3 Tagen vor Beginn sommerlicher Regenereignisse fiel der Druck im Mittel um 0.725 hPa. Vor den Regenereignissen nahm auch die relative Luftfeuchtigkeit mit grosser Regelmässigkeit ab, nämlich in 64 der 66 untersuchten Ereignisse. Die relative Luftfeuchtigkeit begann im Mittel 3.29 Tage vor dem jeweiligen Regenereignis zu sinken und erreichte ihren Tiefpunkt 1.12 Tage vor dem Regenereignis. Im Durchschnitt sank die relative Luftfeuchtigkeit jeweils um 5.042 %. Die Reduktion der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen dem 3. und dem 1. Tag vor sommerlichen Regenereignissen betrug im Durchschnitt 1.23 %. In zwei Dritteln aller untersuchten Situationen gab es kurz vor dem Regenereignis auch einen Temperatursturz. Dieser begann im Durchschnitt 1.7 Tage vor dem Regenereignis und dauerte bis unmittelbar vor dem Regenereignis. Der Temperatursturz betrug im Mittel 1.257° C.

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen sommerlichen Regenereignissen, dem vorgängigen Verlauf des Luftdrucks, der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit:

Nummer des Ereignisses	Datum des Regenereignisses	Regenmenge [mm]	Datum des Temperatursturzes	Umfang des Temperatursturzes [°C]	Dauer zwischen Beginn des Temperatursturzes und Regenbeginn	Dauer zwischen Ende des Temperatursturzes und Regenbeginn [Tage]	Periode des sommerlichen Druckabfalls	Dauer zwischen Beginn des Druckabfalls und Regenbeginn [Tage]	Dauer zwischen Ende des Druckabfalls und Regenbeginn [Tage]	Dauer des Druckabfalls [Tage]	Umfang des Druckabfalls [hPa]	Druckabfall innert 3 Tagen vor Beginn des Regenereignisses [hPa]	Periode der Reduktion der relativen Luftfeuchtigkeit	Dauer zwischen Beginn der Reduktion der rel. Luftfeuchtigkeit und Regenbeginn [Tage]	Dauer zwischen Beginn der Reduktion der rel. Luftfeuchtigkeit und Regenbeginn [Tage]	Reduktion der rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Reduktion zwischen Tag 3-1 vor Regenbeginn [%]
1.	29.01.09-3.02.09	55	29.01.09-30.01.09	-1	0	1	27.01.09-02.02.09	-2	4	6	-3	-0	23.01.09-28.01.09	-6	-1	-7	-5
2.	12.02.09	30	11.02.09-13.02.09	-3	-1	1	07.02.09-13.02.09	-5	1	6	-5	-2	04.02.09-11.02.09	-8	-1	-11	-2
3.	20.02.09-23.02.09	112	20.02.09-21.02.09	-1	0	1	18.02.09-21.02.09	-2	1	3	-4	0	17.02.09-18.02.09	-3	-2	-6	-3
4.	01.03.09-03.03.09	32	-	-	-	-	24.02.09-25.02.09	-5	-4	1	-2	?	24.02.09-28.02.09	-5	-1	-6	-3
5.	15.03.09	10	15.03.09-16.03.09	-1	0	1	08.03.09-13.03.09	-7	-2	5	-9	+6	10.03.09-15.03.09	-5	-2	-5	-0.5
6.	18.03.09	10	18.03.09-19.03.09	-1	0	1	15.03.09-18.03.09	-3	0	3	-6	-6	-	-	-	-	+3
7.	25.03.09-26.03.09	40	-	-	-	-	22.03.09-24.03.09	-3	-1	2	-2	-2	19.03.09-24.03.09	-6	-1	-8	-3
8.	07.04.09-08.04.09	11	05.04.09-06.04.09	-0.5	-2	-1	03.04.09-05.04.09	-4	-2	2	-2	-1	03.04.09-05.04.09	-4	-2	-5	-2
9.	12.04.09-13.04.09	66	11.04.09-13.04.09	-2	-1	1	08.04.09-09.04.09	-4	-3	1	-5	+4	09.04.09-10.04.09	-3	-2	-2	+2
10.	18.04.09-22.04.09	10	18.04.09-19.04.09	-1	0	1	16.04.09-19.04.09	-2	1	3	-4	-3	16.04.09-18.04.09	-2	0	-2.5	-1
11.	10.05.09	15	07.05.09-11.04.09	-2	-3	-1	09.05.09-14.05.09	-1	4	5	-4	-0.5	06.05.09-09.05.09	-4	-1	-5	-4
12.	11.09.09-15.09.09	16	08.09.09-09.09.09	-1	-3	-2	07.09.09-08.09.09	-2	-1	1	-2	+1	08.09.09-11.09.09	-3	0	-5	-3
13.	25.09.09	1	23.09.09-24.09.09	-2	-2	-1	20.09.09-25.09.09	-5	0	5	-4	-3	21.09.09-24.09.09	-4	-1	-9	-7
14.	-	0	-	-	-	-	29.09.09-30.09.09	-	-	1	-4	-	27.09.09-28.09.09	-	-	-2	-
15.	-	0	01.10.09-02.10.09	-2	-	-	01.10.09-05.10.09	-	-	4	-5	-	01.10.09-04.10.09	-	-	-5	-
16.	-	0	-	-	-	-	08.10.09-12.10.09	-	-	4	-5	-	08.10.09-09.10.09	-	-	-2	-
17.	13.11.09-14.11.09	5	12.11.09-13.11.09	-1	-1	0	05.11.09-13.11.09	-8	0	8	-6	-3	06.11.09-10.11.09	-7	-3	-3	+2
18.	17.12.09-22.12.09	14	16.12.09-17.12.09	-1	-1	0	16.12.09-17.12.09	-1	0	1	-1	-1	14.12.09-16.12.09	-3	-1	-4	-4
19.	31.12.09-04.01.10	61	-	-	-	-	25.12.09-29.12.09	-6	-2	4	-3	0	28.12.09-31.12.09	-3	0	-4	-3
20.	03.01.10-04.01.10	50	03.01.10-04.01.10	-1	0	1	-	-	-	0	0	0	02.01.10-03.01.10	-1	0	-2	+5
21.	07.01.10-09.01.10	5.1	06.01.10-07.01.10	-1	-1	0	05.01.10-07.01.10	-2	0	2	-3	-1	05.01.10-08.01.10	-2	1	-6	+3
22.	17.01.10-21.01.10	24	16.01.10-18.01.10	-2	-1	1	15.01.10-20.01.10	-2	3	5	-3	-2	13.01.10-15.01.10	-4	-2	-11	-1
23.	23.01.10	0.5	-	-	-	-	21.01.10-25.01.10	-2	2	4	-4	+2	21.01.10-23.01.10	-2	0	-7	0
24.	16.02.10	1	15.02.10-16.02.10	-	-	-	13.02.10-16.02.10	-3	0	3	-3	-3	13.02.10-15.02.10	-3	-1	-10	-10
25.	22.02.10-23.02.10	35	21.02.10-22.02.10	-	-	-	20.02.10-24.02.10	-2	2	4	-4	0	19.02.10-22.02.10	-3	0	-9	-7
26.	-	0	02.03.10-03.03.10	-1	-	-	01.03.10-06.03.10	-	-	5	-4	-	05.03.10-08.03.10	-	-	-7	-
27.	17.03.10-21.03.10	29.1	15.03.10-16.03.10	-2	-2	-1	13.03.10-16.03.10	-4	-1	3	-2	+2	-	-	-	0	-1
28.	08.04.10-11.04.10	20.5	07.04.10-08.04.10	-1	-1	0	-	-	-	0	0	-1	02.04.10-05.04.10	-6	-3	-4	+1
29.	15.04.10-17.04.10	24	13.04.10-14.04.10	-1	-2	-1	-	-	-	0	0	+1	11.04.10-14.04.10	-4	-1	-6	-4
30.	25.04.10-27.04.10	11	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	22.04.10-23.04.10	-3	-2	-5	-5
31.	08.05.10	10	05.05.10-07.05.10	-3	-3	-1	07.05.10-08.05.10	-1	0	1	-3	-1	07.05.10-08.05.10	-1	0	-2	+6
32.	12.05.10-13.05.10	22	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	09.05.10-10.05.10	-3	-2	-1	-1
33.	17.05.10-18.05.10	17	16.05.10-17.05.10	-2	-1	0	14.05.10-17.05.10	-3	0	3	-3	-3	14.05.10-16.05.10	-3	-1	-5	-5
34.	15.10.10-17.10.10	10	12.10.10-15.10.10	-1.2	-3	0	14.10.10-17.10.10	-1	2	3	-2.1	0	10.10.10-12.10.10	-5	-3	-7	+5

35	21.10.10-22.10.10	27	-	-	-	-	20.10.10-23.10.10	-1	2	3	-3.2	-0.4	18.10.10-21.10.10	-3	0	-5	-3
36	24.11.10	1	22.11.10-23.11.10	-0.2	-2	-1	20.11.10-23.11.10	-3	-1	3	-4.1	-2.7	20.11.10-22.11.10	-4	-2	-5	-3
37	09.12.10	8	-	-	-	-	03.12.10-09.12.10	-6	0	6	-3.9	-3	05.12.10-09.12.10	-4	0	-4	-1
38	-	0	-	-	-	-	11.12.10-13.12.10	-	-	2	-3	-	11.12.10-13.12.10	-	-	-7	-
39	10.01.11-12.01.11	40	-	-	-	-	06.01.11-09.01.11	-4	-1	3	-0.3	+0.2	05.01.11-07.01.11	-5	-3	-5	0
40	21.01.11-27.01.11	67.6	-	-	-	-	17.01.11-21.01.11	-4	0	4	-3.3	-2.8	13.01.11-18.01.11	-8	-3	-13	+5
41	03.02.11	7	01.02.11-02.02.11	-0.4	-2	-1	30.01.11-05.02.11	-4	2	6	-2.9	-0.3	31.01.11-02.02.11	-3	-1	-4	-4
42	19.02.11-22.02.11	6.7	-	-	-	-	17.02.11-19.02.11	-2	0	2	-1.6	-1.2	14.02.11-16.02.11	-5	-3	-7	+1
43	25.02.11-01.03.11	103	-	-	-	-	122.02.11-01.03.11	-3	4	7	-3.3	-2.6	-	-	-	0	0
44	10.03.11-11.03.11	16	08.03.11-10.03.11	-0.9	-2	0	03.03.11-07.03.11	-7	-3	4	-1.2	-0.3	07.03.11-09.03.11	-3	-1	-5	-5
45	24.03.11	76	23.03.11-25.03.11	-0.8	-1	1	16.03.11-21.03.11	-8	-3	5	-3.8	+2	23.03.11-24.03.11	-1	0	-4	+2
46	03.09.11	8	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-0.4	30.08.11-01.09.11	-4	-2	-6	-2
47	-	0	29.09.11-02.10.11	-1.4	-	-	25.09.11-02.10.11	-	-	7	-3	-	27.09.11-29.09.11	-	-	-5	-
48	19.10.11-21.10.11	12.2	-	-	-	-	16.10.11-18.10.11	-3	-1	2	-2.2	+0.3	16.10.11-17.10.11	-3	-2	-3	-3
49	28.10.11-31.10.11	1.1	26.10.11-29.10.11	-1.2	-2	1	24.10.11-30.10.11	-4	3	7	-3.6	-0.7	27.10.11-29.10.11	-1	1	-5	+4
50	04.11.11-05.11.11	4	01.11.11-05.11.11	-1.1	-3	1	03.11.11-08.11.11	-1	4	5	-3.4	+2.5	03.11.11-04.11.11	-1	0	-5	+1
51	07.11.11-14.11.11	19.1	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-1.4	06.11.11-07.11.11	-1	0	-4	+4
52	28.11.11	6	27.11.11-29.11.11	-1.1	-1	1	24.11.11-30.11.11	-4	2	6	-3	-1.2	23.11.11-26.11.11	-5	-2	-7	-1
53	05.12.11	0.5	04.12.11-06.12.11	-1.2	-1	1	02.12.11-07.12.11	-3	2	5	-1.9	-0.9	04.12.11-05.12.11	-1	0	-3	+1
54	19.12.11-21.12.11	5	16.12.11-18.12.11	-1.1	-3	-1	17.12.11-19.12.11	-2	0	2	-0.5	+0.1	17.12.11-18.12.11	-2	-1	-3	-3
55	18.01.12-23.01.12	112	14.01.12-16.01.12	-1.6	-4	-2	14.01.12-19.01.12	-4	1	5	-2.3	+0.4	15.01.12-17.01.12	-3	-1	-7	0
56	-	0	-	-	-	-	05.02.12-08.02.12	-	-	3	-3.2	-	06.02.12-07.02.12	-	-	-7	-
57	17.02.12-21.02.12	66	14.02.12-16.02.12	-1.1	-3	-1	11.02.12-17.02.12	-6	0	6	-2.1	-1.2	11.02.12-14.02.12	-6	-3	-7	0
58	24.02.12	0.2	20.02.12-23.02.12	-0.7	-4	-1	21.02.12-24.02.12	-3	0	3	-3.3	-3.3	22.02.12-24.02.12	-2	0	-8	-3
59	09.03.12-12.03.12	6.6	06.02.12-07.02.12	-0.3	-3	-2	03.03.12-07.03.12	-6	-2	4	-1.4	?	06.03.12-07.03.12	-3	-2	-1	?
60	24.03.12	10	19.03.12-21.03.12	-1.5	-5	-3	16.03.12-23.03.12	-8	-1	7	-3.2	?	19.03.12-20.03.12	-5	-4	-5	?
61	09.04.12-10.04.12	15	07.04.12-11.04.12	-2	-2	2	06.04.12-09.04.12	-3	0	3	-1.8	-1.8	08.04.12-09.04.12	-1	0	-5	+2
62	13.04.12	0.1	-	-	-	-	11.04.12-14.04.12	-2	1	3	-2	-0.1	11.04.12-12.04.12	-2	-1	-2	-9
63	20.04.12	3	16.04.12-19.04.12	-1	-4	-1	18.04.12-20.04.12	-2	0	2	-2.5	-1.8	18.04.12-19.04.12	-2	-1	-5	-2
64	-	0	23.04.12-25.04.12	-0.8	-	-	25.04.12-28.04.12	-	-	3	-1.1	-	26.04.12-28.04.12	-	-	-4	-
65	13.05.12	0.1	10.05.12-12.05.12	-1.1	-3	-1	11.05.12-13.05.12	-2	0	2	-1.2	-0.9	10.05.12-11.05.12	-3	-2	-2	+1
66	19.05.12-20.05.12	1.2	17.05.12-19.05.12	-1.1	-2	0	16.05.12-18.05.12	-3	-1	2	-1.2	-0.6	17.05.12-18.05.12	-2	-1	-4	-1
	Ø	22.775 mm		1.257° C	1.705 Tage	0.136 Tage		-3.57 Tage	0.174 Tage	3.33 Tage	-2.736 hPa	-0.725 hPa		3.29 Tage	1.12 Tage	5.042 %	-1.2307 %

Aus der Grafik 12 (Seite 22) ist ersichtlich, dass in der Regel die relative Luftfeuchtigkeit mit jedem Regenereignis zunimmt. Um den genauen Zusammenhang zwischen Regenereignis und dem Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit zu ergründen, wurden fast sämtliche Regenereignisse des Untersuchungsperiode in Tabelle 6 (Seite 18) dargestellt.

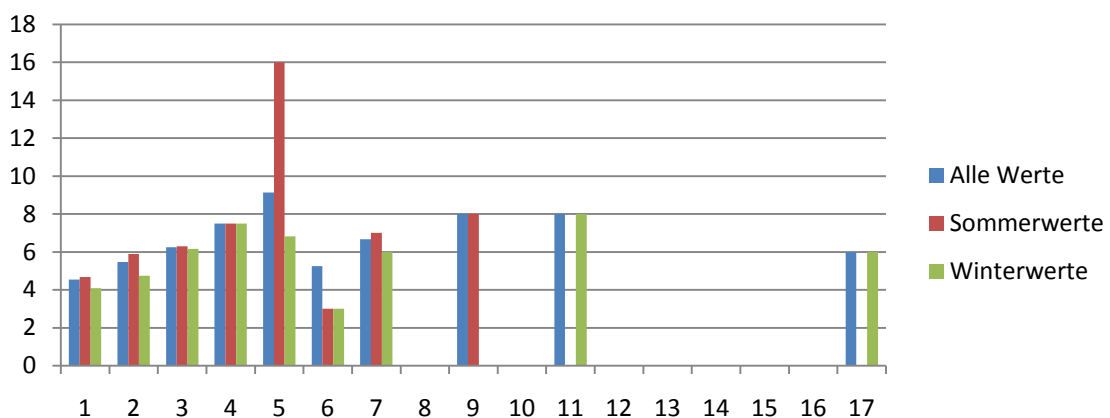
Tabelle 6: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit vor, während und nach isolierten Regenereignissen

Nr.	Datum Regenereignisses	Dauer des Regen- ereignisses	Regen- menge total	Mittl. tägl. Regen- menge	Sommer/Winter	Beginn des Anstiegs der rel. Luftfeuchtigkeit	Dauer des Anstiegs der rel. Luftfeuchtigkeit	Differenz zw. Dauer des Anstiegs der Luftfeuchtigkeit und Dauer des Regenereignisses	Umfang des Anstiegs der rel. Luftfeuchtigkeit
1	29.01.09-03.02.09	5	55	11	S	-1	7	2	21
2	12.02.09	1	30	30	S	-1	2	1	7
3	20.02.09-23.02.09	4	112	28	S	-2	6	2	11
4	15.03.09	1	10	10	S	0	1	0	3
5	18.03.09	1	10	10	S	0	1	0	2
6	25.03.09	2	40	20	S	-1	3	1	10
7	07.04.09-08.04.09	2	11	5.5	S	-2	4	2	5
8	10.05.09	1	15	15	S	-1	3	2	5
9	21.05.09-22.05.09	2	16	8	W	0	2	0	3
10	18.08.09-19.08.09	2	7	3.5	W	0	4	2	4
11	24.08.09-25.08.09	2	57	28.5	W	0	3	1	7
12	06.09.09-07.09.09	2	2	1	S	0	2	0	3
13	15.10.09-16.10.09	2	0.7	0.35	S	-1	3	1	5
14	13.11.09-14.11.09	2	5	2.5	S	0	2	0	7
15	17.12.09	1	4	4	S	-1	2	1	8
16	22.12.09	1	10	10	S	0	2	1	5
17	21.02.10-23.02.10	3	35.5	11.5	S	1	3	0	13
18	14.03.10	1	2	2	S	0	2	1	8
19	17.03.10-21.03.10	4	29.1	7.3	S	0	7	3	12
20	25.03.10-26.03.10	2	11	5.5	S	0	3	1	6
21	01.04.10-02.04.10	2	5	2.5	S	0	1	-1	7
22	15.04.10-17.04.10	3	24	8	S	0	3	0	6
23	25.04.10-27.04.10	3	11	3.7	S	-1	2	-1	3
24	08.05.10	1	10	10	S	0	1	0	1
25	12.05.10-13.05.10	2	22	11	S	0	2	0	8
26	16.05.10-18.05.10	3	17.1	5.7	S	0	3	0	4
27	04.06.10	1	61	61	W	-1	3	2	9
28	25.06.10-28.06.10	4	8.8	2.2	W	-1	4	0	10
29	07.07.10-08.07.10	2	1.4	0.7	W	0	1	-1	11
30	10.07.10	1	0.1	0.1	W	0	1	0	2
31	12.07.10	1	2	2	W	0	1	0	8
32	14.07.10-16.07.10	3	5.4	2.8	W	0	2	-1	14
33	27.07.10-31.07.10	5	6.5	1.3	W	-1	6	1	5
34	02.08.10-07.08.10	6	35	5.8	W	0	7	1	7
35	09.08.10	1	22	22	W	0	1	0	3
36	21.08.10-26.08.10	6	31.5	5.3	W	0	6	0	5
37	29.08.10-04.09.10	7	9.2	1.3	W	-1	8	1	6
38	06.09.10	1	1	1	W	0	1	0	3
39	09.09.10	1	5	5	W	0	1	0	4
40	11.09.10-14.09.10	4	17.1	4.3	W	0	3	-1	9
41	16.09.10	1	6	6	S	0	1	0	2
42	27.09.10	1	3	3	S	-1	2	1	6
43	01.10.10	1	0.1	0.1	S	0	1	0	5
44	15.10.10	1	5	5	S	-3	4	3	7
45	17.10.10	1	5	5	S	0	1	0	4
46	21.10.10-23.10.10	3	27.1	8.7	S	0	1	-2	7
47	28.10.10	1	0.5	0.5	S	0	1	0	3
48	04.11.10	1	0.5	0.5	S	-1	2	1	12
49	08.11.10	1	0.2	0.2	S	-1	1	0	1
50	10.11.10-11.11.10	2	0.3	0.15	S	-1	2	0	13
51	19.11.10	1	0.1	0.1	S	-1	2	1	7
52	24.11.10	1	1	1	S	0	1	0	6
53	09.12.10-11.12.10	3	8.2	2.7	S	0	2	-1	8
54	16.12.10-17.12.10	2	21.1	10.6	S	-3	5	3	7
55	21.12.10	1	0.5	0.5	S	-3	2	1	5
56	28.12.10	1	0.1	0.1	S	0	3	2	6
57	04.01.11-05.01.11	2	0.6	0.3	S	0	1	-1	5
58	10.01.11-12.01.11	3	40	13.3	S	0	3	0	11
59	19.01.11	1	0.1	0.1	S	0	1	0	5

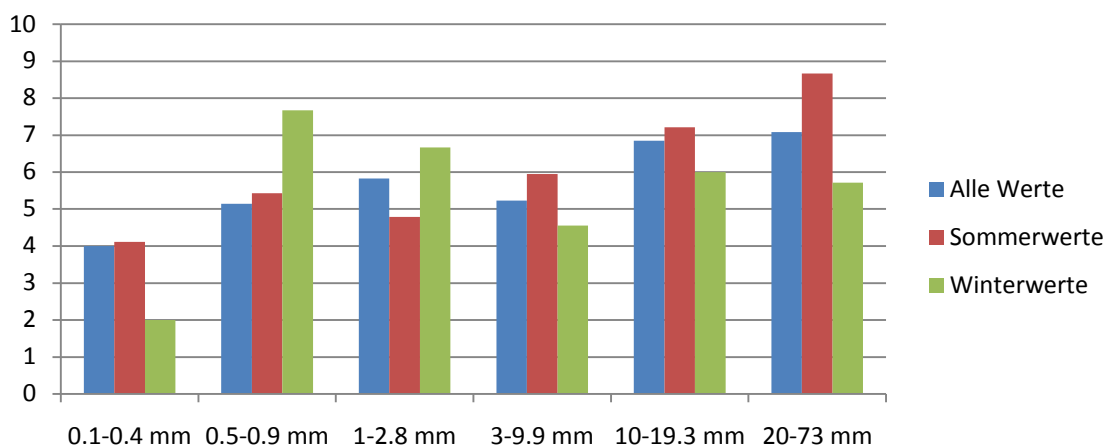
60	21.01.11-27.01.11	7	67.6	9.7	S	-1	8	1	6
61	03.02.11	1	7	7	S	-1	2	1	4
62	08.02.11	1	2	2	S	-1	1	0	1
63	19.02.11-22.02.11	4	6.7	1.5	S	-1	4	0	6
64	25.02.11-27.02.11	3	58	19.3	S	0	2	-1	2
65	01.03.11	1	45	45	S	0	1	0	5
66	07.03.11	1	1	1	S	-1	1	0	1
67	10.03.11-11.03.11	2	16	8	S	-1	1	-1	9
68	24.03.11	1	76	76	S	0	1	0	10
69	26.03.11-27.03.11	2	0.6	0.3	S	1	1	-1	2
70	31.03.11	1	0.5	0.5	S	-1	1	0	2
71	07.04.11-08.04.11	2	66	33	W	0	1	-2	5
72	11.04.11-15.04.11	5	53.3	10.7	W	0	3	-2	8
73	17.04.11-22.04.11	6	131	21.8	W	0	4	-2	6
74	28.04.11-29.04.11	2	112	56	W	0	1	-1	4
75	01.05.11-05.05.11	5	362	72.4	W	-1	5	0	6
76	08.05.11-10.05.11	3	15.5	5.2	W	0	2	-1	4
77	14.05.11	1	4	4	W	0	1	0	1
78	16.05.11	1	7	7	W	0	1	0	2
79	19.05.11-20.05.11	2	22.5	11.3	W	0	1	-1	6
80	23.05.11-25.05.11	3	18	6	W	-1	2	-1	6
81	28.05.11-01.06.11	5	19.5	3.9	W	-1	4	-1	5
82	04.06.11	1	15	15	W	0	1	0	2
83	07.06.11	1	4	4	W	-1	2	1	3
84	10.06.11-12.06.11	3	4.3	1.4	W	0	2	-1	4
85	15.06.11-19.06.11	5	56.1	11.2	W	0	5	0	10
86	21.06.11-23.06.11	3	30	10	W	0	2	-1	3
87	27.06.11	1	1	1	W	0	1	0	6
88	01.07.11-17.07.11	17	167.7	9.9	W	0	17	0	6
89	22.07.11-01.08.11	11	70.9	6.4	W	-1	12	1	8
90	07.08.11-08.08.11	2	9	4.5	W	-1	2	0	7
91	13.08.11	1	0.5	0.5	W	-1	2	1	6
92	15.08.11-17.08.11	3	1.6	0.5	W	0	2	-1	6
93	19.08.11-23.08.11	5	51.2	10.2	W	0	5	0	7
94	25.08.11-26.08.11	2	15.5	7.8	W	0	1	-1	2
95	29.08.11-30.08.11	2	2.1	1.1	W	-1	2	0	4
96	02.09.11-03.09.11	2	8.2	4.1	W	-1	2	0	2
97	10.09.11	1	0.5	0.5	S	-1	2	1	7
98	13.09.11	1	0.1	0.1	S	0	1	0	3
99	15.09.11	1	0.2	0.2	S	0	1	0	1
100	18.10.11-21.10.11	4	12.3	3.1	S	1	3	-1	1
101	28.09.11	1	1	1	S	1	1	0	4
102	31.10.11-02.11.11	3	1.2	0.4	S	0	3	0	2
103	04.10.11-05.11.11	2	4	2	S	0	2	0	4
104	07.11.11-15.11.11	9	19.9	2.2	S	0	9	0	8
105	22.11.11	1	6	6	S	-2	3	2	9
106	05.12.11	1	0.5	0.5	S	0	1	0	4
107	19.12.11-21.12.11	3	5	1.7	S	-1	4	1	7
108	23.12.11-24.12.11	2	1.1	0.6	S	1	1	-1	2
109	11.01.12	1	2	2	S	0	1	0	7
110	14.01.12	1	11	11	S	0	1	0	4
111	18.01.12-24.01.12	7	113.1	16.2	S	-1	8	1	8
112	30.01.12-31.01.12	2	0.2	0.1	S	-1	3	1	5
113	02.02.12	1	1	1	S	0	1	0	3
114	15.02.12	1	0.1	0.1	S	-1	1	0	1
115	17.02.12-21.02.12	5	66	13.2	S	-1	6	1	11
116	24.02.12	1	0.2	0.2	S	0	1	0	3
117	26.02.12	1	0.5	0.5	S	0	1	0	5
118	11.03.12-12.03.12	2	6.1	3.2	S	-1	2	0	5
119	03.04.12-04.04.12	2	1.5	0.8	S	0	1	-1	2
120	07.04.12	1	0.1	0.1	S	-1	1	0	2
121	09.04.12-10.04.12	2	15	7.5	S	0	1	-1	9
122	13.04.12	1	0.1	0.1	S	-1	3	2	3
123	20.04.12	1	31	31	S	-1	2	1	9
124	03.05.12-08.05.12	6	2.8	0.5	S	-1	4	-2	3
125	13.05.12	1	0.1	0.1	S	0	1	0	5
126	19.05.12-20.05.12	2	1.2	0.6	S	0	2	0	4
127	22.05.12-25.05.12	4	27.1	6.8	W	0	3	-1	8
128	28.05.12-31.05.12	4	19.1	4.8	W	0	4	0	3
129	02.06.12-03.06.12	2	18.1	9.1	W	1	1	-1	2
Ø		2.49	21.50	8.09		-0.40	+2.64	+0.14	+5.59
Ø S		2.02	14.16	6.61		-0.48	2.35	0.33	5.65
Ø W		3.33	34.74	10.75		-0.26	3.15	-0.2	5.48

Aus der Tabelle 6 (Seite 18) kann folgendes geschlossen werden: Untersucht wurden 129 Regenereignisse, die insgesamt 132 Tagen stattfanden. 83 von ihnen fanden während einer Trockenzeit statt, 46 während einer Regenzeit. Im Durchschnitt dauerten die einzelnen Regenereignisse 2.49 Tage, in denen es durchschnittlich 21.5 mm regnete. Dies macht eine durchschnittliche tägliche Regenmenge von 8 mm aus. Die relative Luftfeuchtigkeit nahm pro Regenereignis im Durchschnitt um 5.59% zu. Der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit begann im Mittel 0.4 Tage vor Regenbeginn und dauerte im Durchschnitt 2.64 Tage, also 0.14 Tage länger als das Regenereignis. Die Regenereignisse während der Sommerzeit dauerten weniger lang und waren insgesamt weniger als halb so ergiebig wie diejenigen der Regenzeit. Auch die tägliche Regenmenge war in Regenereignissen der Trockenzeit weit geringer als während der Regenereignisse der Regenzeit. Die Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit begann vor Regenereignissen während der Trockenzeit viel früher als vor Regenereignissen der Regenzeit, hingegen erfolgte das Ende der Zunahme der relativen Feuchtigkeit in der Regenzeit vor dem Ende des Regenereignisses. In 38% aller Regenereignisse begann die Luftfeuchtigkeit vor dem Regenbeginn zu steigen, in 58% aller Regenereignisse geschah dies am Tag des Regenbeginns, in 4.7% der Regenereignisse einen Tag nach Regenbeginn. Daraus können wir schliessen, dass der Regen sowohl Ursache wie auch Folge hoher Luftfeuchtigkeit sein kann, oder in anderen Worten: Die Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Bereich von Tagen sind teilweise hausgemacht, d.h. Folgen der vorangegangenen Regenereignisse.

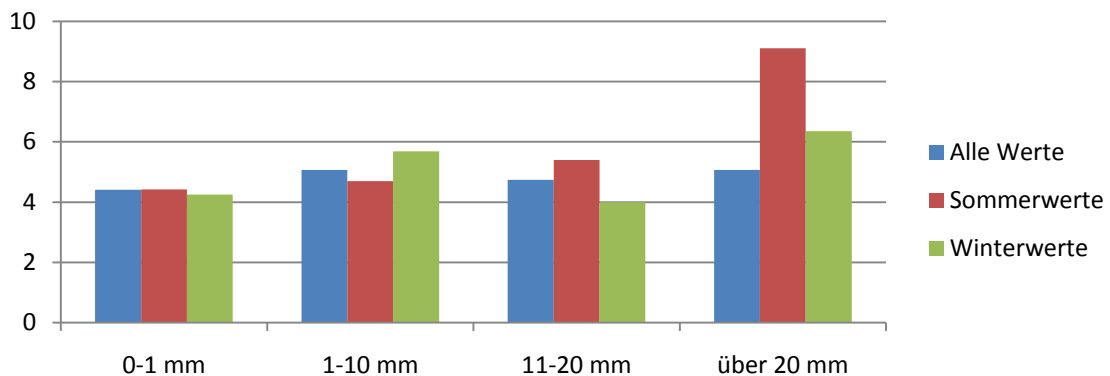
Grafik 9: Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit während Regenereignissen in Abhängigkeit der Dauer der Regenereignisse:



Grafik 10: Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit während Regenereignissen in Abhängigkeit der mittleren täglichen Regenmenge:



Grafik 11: Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit während Regenereignissen in Abhängigkeit der Regenmenge pro Ereignis:



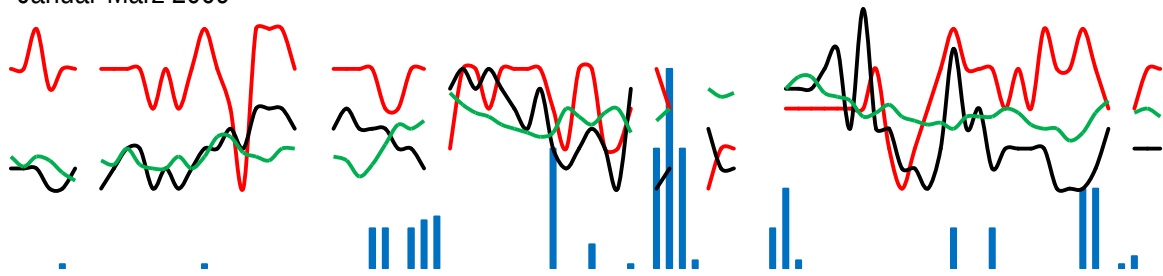
Die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit hängt zwar offenbar von der Existenz von Regenereignissen der vorangegangenen Tage ab, nur wenig jedoch von der Regenmenge. Auch sehr kleine Regenmengen können eine ansehnliche Erhöhung der Luftfeuchtigkeit bewirken, andererseits bewirkt eine grosse Regenmenge nicht zwingend eine entsprechend grosse Erhöhung der Luftfeuchtigkeit. Je länger das Regenereignis dauert, desto stärker der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Erhöhungen der Luftfeuchtigkeit kumulieren sich, wenn sich die Regenereignisse während mehrerer Tage fortsetzen. Diese Aussage gilt jedoch nur bis zum 5. Regentag, an dem ein mittlerer Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 9% erwartet werden kann. Dauert das Regenereignis länger, steigt die relative Luftfeuchtigkeit nicht mehr an (vgl. Grafik 9, Seite 20). Offensichtlich gibt es ein Höchstmass an relativer Feuchtigkeit, das nicht überschritten wird. Der Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit ist fast unabhängig von der mittleren täglichen Regenmenge, einmal abgesehen von sehr tiefen Werten bis 0.4 mm Regen pro Tag. Auch bei sehr hohen täglichen Regenmengen steigt die relative Luftfeuchtigkeit nur unwesentlich stärker an als bei geringen täglichen Regenmengen über 0.5 mm (vgl. Grafik 10, Seite 20). Auch die absolute Regenmenge pro Regenereignis hat nur wenig Einfluss auf den Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit. Regenmengen von 1 mm bewirken einen ähnlichen Anstieg wie Rekord-Regenereignisse. Lediglich Starke Niederschläge während der Trockenzeit lassen die relative Luftfeuchtigkeit stärker ansteigen.

Zwei Beobachtungen lassen den Schluss zu, dass die relative Luftfeuchtigkeit nicht nur Ursache, sondern auch Folge von Regenereignissen sein muss: Es ist dies einerseits die Tatsache, dass sich die Erhöhungen der relativen Luftfeuchtigkeit von mehrtägigen Regenereignissen kumulieren, andererseits die Tatsache, dass nach Abschluss des Regenereignisses die Luftfeuchtigkeit noch weiter ansteigt.

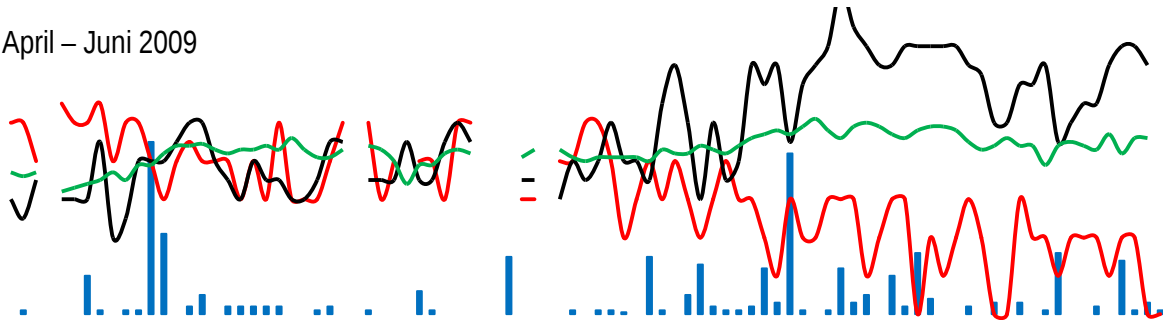
Was passiert in Trockenperioden mit der relativen Luftfeuchtigkeit? Grafik 12 (Seite 22) gibt darüber Auskunft: Nach Abschluss eines Regenereignisses steigt sie nur noch kurz weiter an, danach beginnt sie bei Ausbleiben weiterer Regengüsse zu sinken, bis sie sich auf dem der Jahreszeit üblichen Mittelwert angekommen ist. Kurz vor dem nächsten Regenereignis sinkt die relative Luftfeuchtigkeit dann in der Regel nochmals ab. Nicht selten sind aber auch Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit während der Trockenperiode, mit oder ohne geringe Regengüsse.

Grafik 12: Morgendliche Temperatur (rot), Luftdruck (schwarz), Luftfeuchtigkeit (grün) und tägliche Regenmenge (blau)

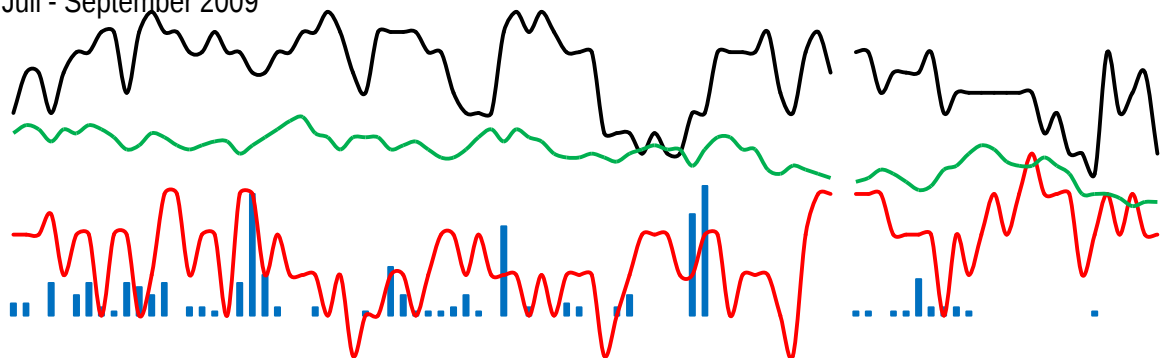
Januar-März 2009



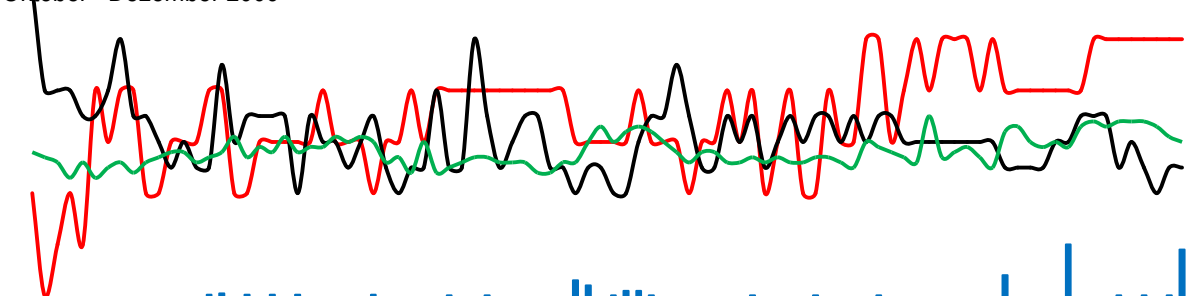
April – Juni 2009



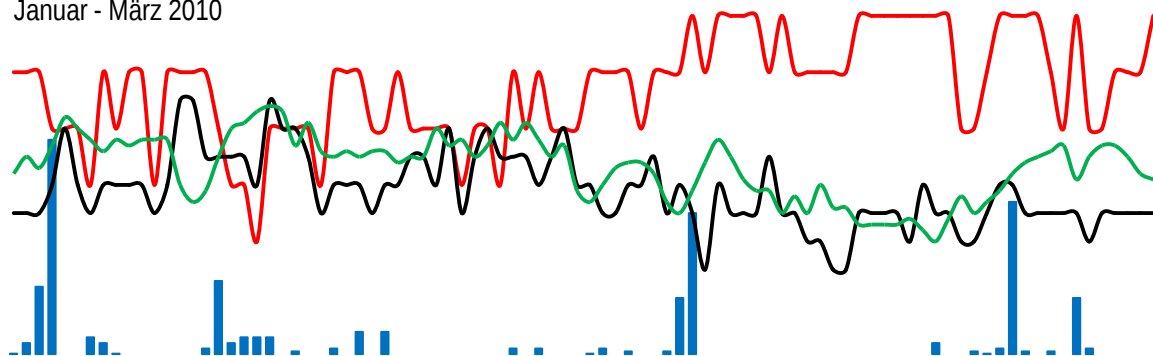
Juli - September 2009



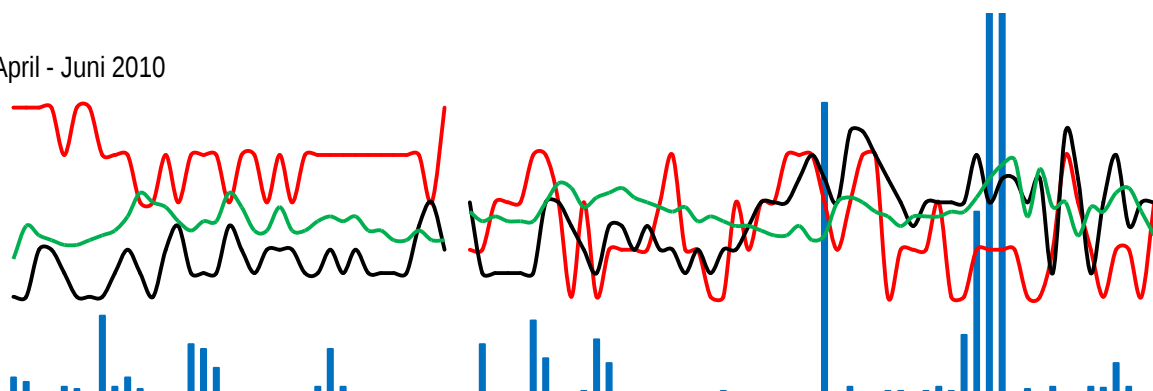
Oktober - Dezember 2009



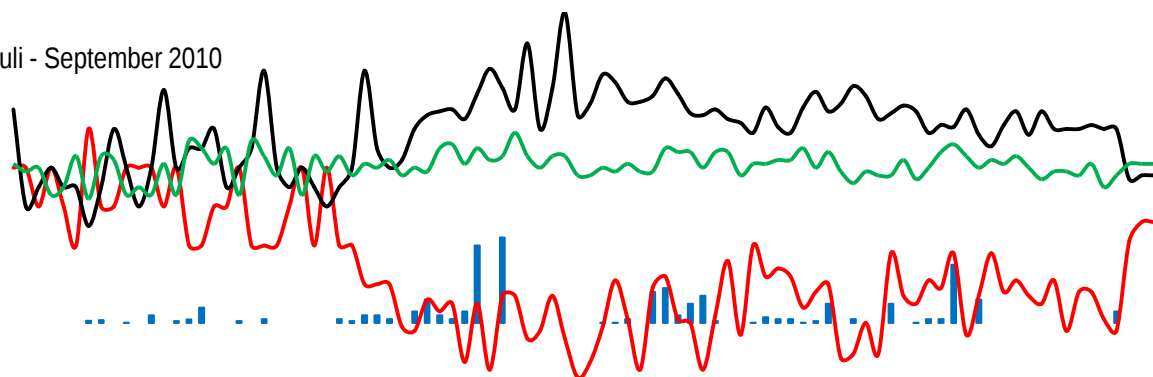
Januar - März 2010



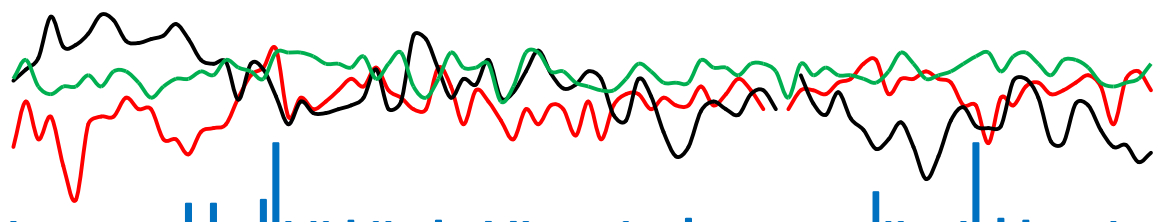
April - Juni 2010



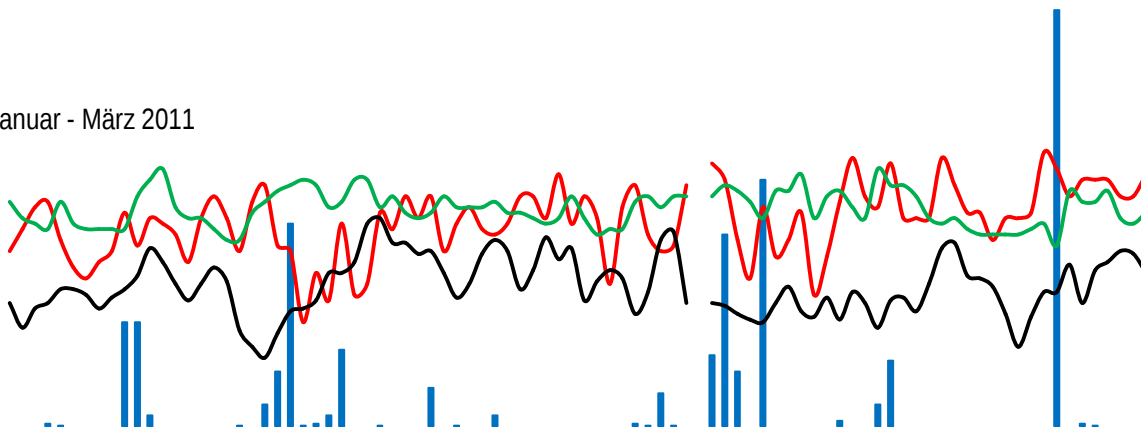
Juli - September 2010



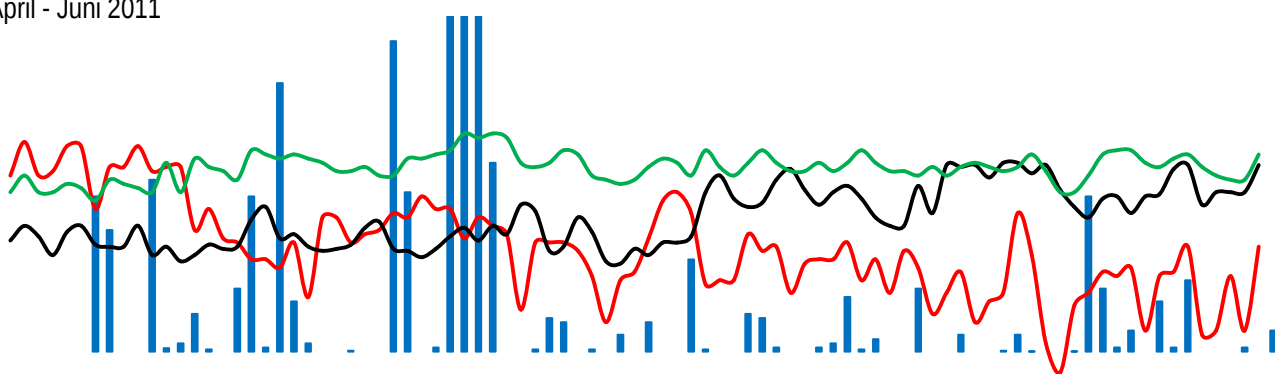
Oktober - Dezember 2010



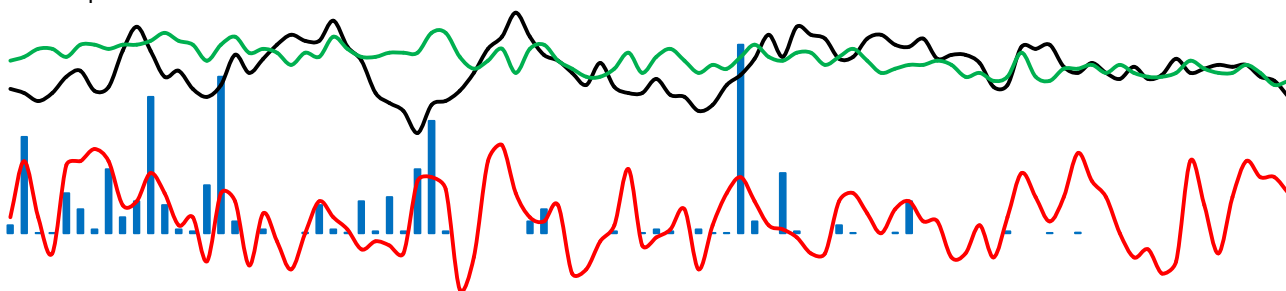
Januar - März 2011



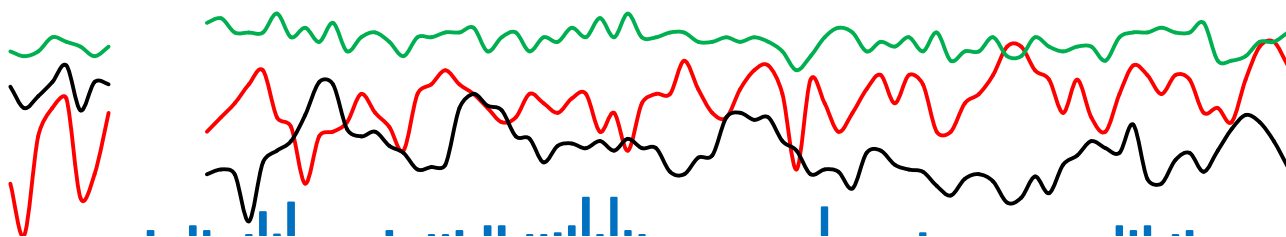
April - Juni 2011



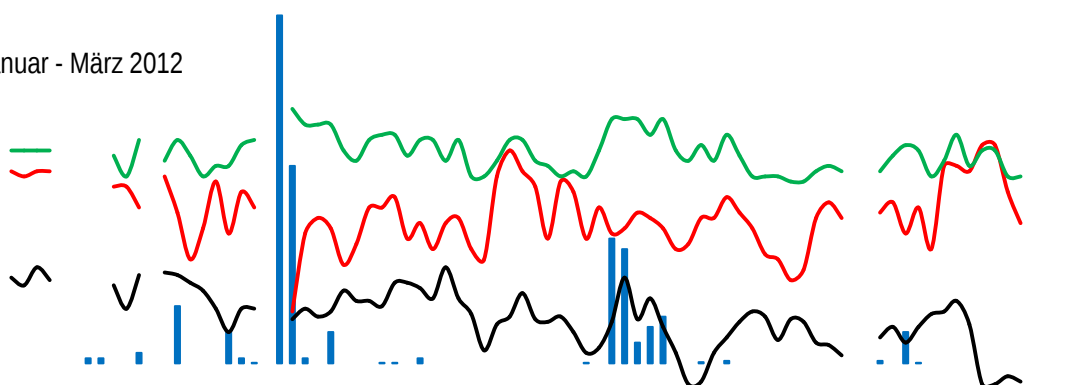
Juli - September 2011



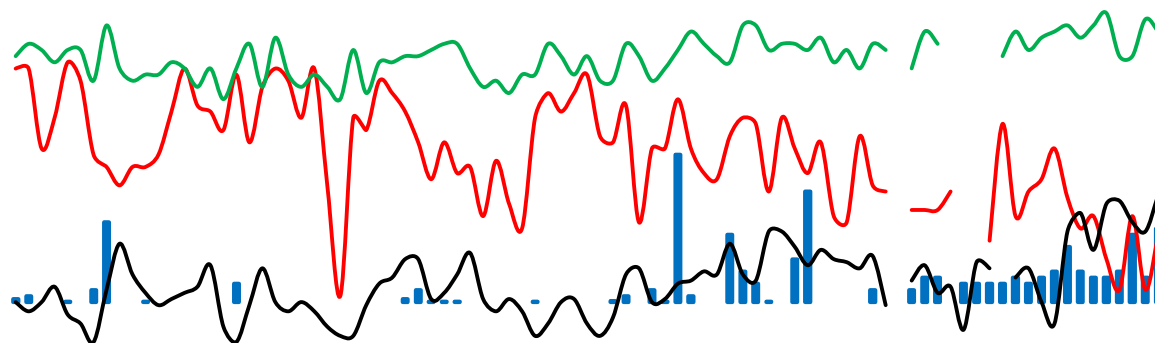
Oktober - Dezember 2011



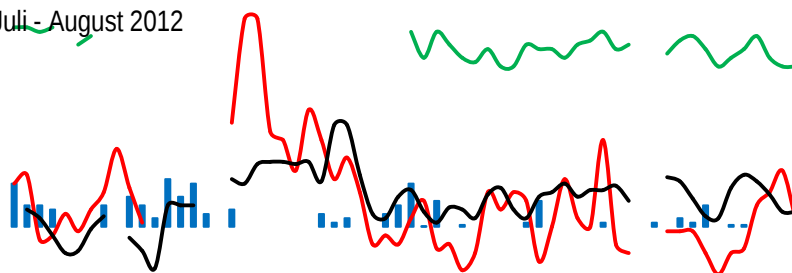
Januar - März 2012



April - Juni 2012



Juli - August 2012



4. Interpretation der Resultate

Es gibt eine zahlreiche Literatur über die Klimaverhältnisse im Nordosten Brasiliens. Sie alle befassen sich hauptsächlich mit der Frage, welche meteorologischen Phänomene für Regenereignisse verantwortlich sind. Es werden folgende Wetterphänomene genannt:

1. Meeresbrise (= Sea breeze)
2. Kaltfronten (= Cold fronts)
3. Zyklonischer Wirbelwind der oberen Troposphäre (= Upper tropospheric cyclonic Vortex)
4. Passatwind (= Trade wind)
5. Innertropische Konvergenzzone
6. Südatlantisches Subtropisches Hochdruckgebiet (= South Atlantic Subtropical Anticyclone SASA),
7. Störung der Tropischen Welle (= Easterly Wave disturbance= ondas de leste)
8. Steigungsregen an Gebirgen
9. Instabilitätslinien (= Linhas de instabilidade)
10. Wolkengruppen (= Cloud clusters = Complexos convectivos de mesoescala)
11. Madden-Julian Oszillation

Die lokalen in Cumarú gesammelten Daten können nur bedingt das eine oder andere dieser mehrheitlich regionalen Phänomene bestätigen oder widerlegen. Allerdings vermögen auch die in der Literatur beschriebenen Phänomene nur teilweise die in Cumarú festgestellten Verhältnisse zu erklären. Daher versuche ich zunächst, Zusammenhänge zwischen den in Cumarú herrschenden Verhältnissen und den in der Literatur vorhandenen Erklärungsversuchen für Regenereignisse herzustellen, danach sei mir erlaubt, einen Versuch zu unternehmen, die klimatischen Verhältnisse von Cumarú auf meine eigene Art zu interpretieren.

4.1. Bemerkungen zu in der Literatur beschriebenen Klimaphänomenen:

Die Meeresbrise und die Passatwinde sind mit Sicherheit die in Cumarú wetterbestimmenden Klimaphänomene. Einerseits weht in Cumarú tagsüber stets ein Wind aus Osten, andererseits stimmt die Verteilung von Regenzeit und Trockenzeit in Cumarú weitgehend mit Orten in Küstennähe überein, unterscheidet sich jedoch wesentlich von Orten weiter im Landesinnern. Den seltenen Sommerregen in Cumarú gehen oft eine Druckreduktion, ein Temperatursturz und eine Erniedrigung der Luftfeuchtigkeit voraus, was Indizien dafür sind, dass sie durch Kaltfronten von Süden ausgelöst werden. Gemäss Dantas Marciano (2012) finden die Störungen der Tropischen Welle (Easterly Wave disturbance= ondas de leste) in den Monaten Mai bis August statt und scheinen vor allem Einfluss auf die Küstenregion zwischen Bahia und Ceará zu haben. Demnach ist anzunehmen, dass auch Cumarú im Einflussbereich dieses Klimaphänomens liegt. Auch C. Dizerens bestätigt in ihrem Brief (vgl. Kap. 7), dass die Kaltfronten in Zusammenhang mit den Wellenzügen der mittleren Breiten zu sehen sind. Eindeutig ausgeschlossen werden kann in Cumarú der direkte Einfluss der innertropischen Konvergenzzone, weil die Regenzeit in Cumarú nicht mit dem Südsommer zusammenfällt und nicht von einer Reduktion, sondern von einer Erhöhung des Luftdrucks begleitet wird. Angesichts der Tatsache, dass das Zentrum von Cumarú – und damit die Mess-Station der hier diskutierten Daten - westlich eines Gebirgszugs liegt, kann Steigungsregen als Ursache von Niederschlägen ausgeschlossen werden. Im Gegenteil ist eher wahrscheinlich, dass die Regenmenge wegen dieser Anhöhen in Cumarú geringer ist als beispielsweise in Passira. Ein allfälliger Einfluss zyklonischer Wirbelwinde der oberen Troposphäre, des südatlantischen Hochdruckgebiets, Wolkengruppen, der Madden-Julian-Oszillation und der Instabilitätslinien auf das Klima von Cumarú kann anhand der lokalen Daten nicht beurteilt werden.

4.2. Versuch einer eigenen Interpretation der meteorologischen Messdaten von Cumaru:

Um die im Kapitel 3 beschriebenen Phänomene besser zu verstehen, können wir zwischen den täglichen Ereignissen und dem Verlauf während des Jahres unterscheiden.

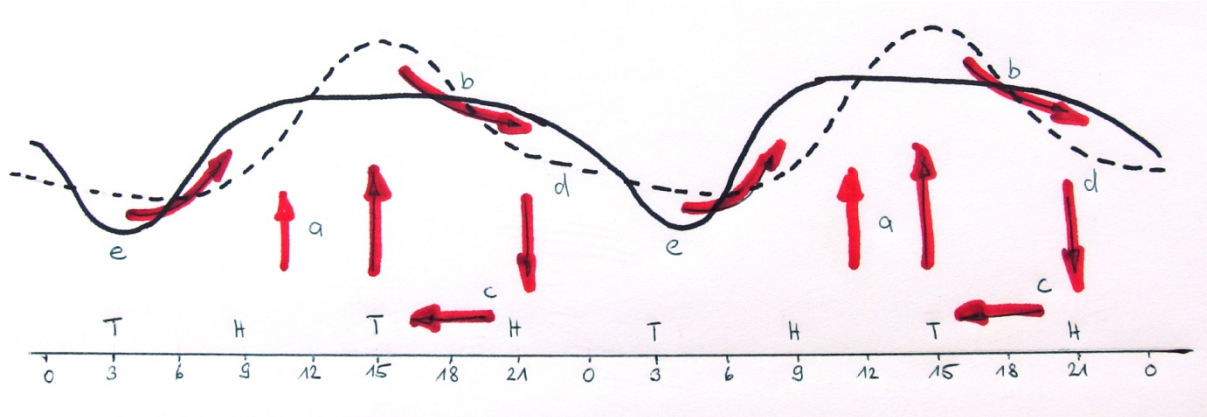
Tagesverlauf der Klima-Parameter

Aufgrund der gemessenen Daten kann der Tag in Cumaru aus meteorologischer Sicht in folgende fünf Phasen unterteilt werden. Siehe dazu auch die Abbildung 1 Seite 28.

- a. Lufterwärmung während des Morgens: Zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs herrscht die tiefste Temperatur des Tags. Sobald die Sonne zu scheinen beginnt, erwärmen sich Boden und Atmosphäre, und die relative Luftfeuchtigkeit nimmt ab. Die erwärmte Luft dehnt sich aus, wird leichter und steigt auf. Dadurch entsteht in den höheren Schichten der Atmosphäre eine Erhebung. Da der Sonnenaufgang auf dem ganzen Längengrad gleichzeitig erfolgt, hat die Erhebung die Form einer Welle, die sich mit der Geschwindigkeit der Erdumdrehung von Osten nach Westen bewegt. Diese Geschwindigkeit beträgt in Cumaru über 1'500 km pro Stunde. Während die warme Luft aufsteigt, kühlt sie sich wieder ab, womit die relative Luftfeuchtigkeit wiederum abnimmt. Dies kann Wolkenbildung zur Folge haben, was wiederum die Erwärmung der Erdoberfläche und der darüber liegenden Luftschichten verringert. Eine hohe Luftfeuchtigkeit und Feuchtigkeit im Boden bei Tagesbeginn erhöht die Wahrscheinlichkeit der Wolkenbildung. Die Sonneneinstrahlung nimmt bis zur Mittagszeit zu, die Erwärmung des Bodens erfolgt jedoch verzögert, weil er die Kälte der vorangegangenen Nacht besser speichert als die Atmosphäre. Die Erwärmung der Atmosphäre durch die Sonnenstrahlung nimmt daher bis ca. 14.30 Uhr zu.
- b. Verfrachtung der Luftwelle nach Osten: Die durch die Erwärmung der Atmosphäre entstehende Luftwelle sucht den Niveau-Ausgleich durch Windströmung ins Wellental. Diese Verfrachtung der Luftmassen geschieht hauptsächlich nach Osten, weil die Welle sich schneller nach Westen fortpflanzt als die maximale Windgeschwindigkeit. Im Sommer ist auch eine Ablenkung dieses Höhenwindes nach Nordosten denkbar, weil sich die Atmosphäre über dem dort liegenden Atlantik weniger rasch aufwärmt als über der Landmasse, womit die Luftwelle über dem Wasser weniger hoch ist.
- c. Zunahme des Luftdrucks in Bodennähe und druckausgleichender Wind: Die Verfrachtung der Höhenluft nach Osten bewirkt eine Abnahme des Bodenluftdrucks unter der Welle und eine Zunahme des Bodenluftdrucks unter dem Wellental östlich davon. In Bodennähe entsteht ein Wind von Osten nach Westen, der versucht, die benachbarten Unterschiede des Bodenluftdrucks auszugleichen. Dieser Wind ist in Cumaru täglich deutlich zu spüren. Diese Phase dauert an, so lange die Luft durch die Sonne erwärmt wird.
- d. Abkühlung der Atmosphäre ab Nachmittag: Ungefähr ab 14.30 Uhr nimmt die Erwärmung der Atmosphäre ab. Die Luftmassen beginnen sich zu verdichten, womit sich in den oberen Luftschichten ein Wellental bildet. Bis etwa 21 Uhr gelingt es der aus Westen zufließenden Höhenluft, dieses Wellental aufzufüllen. Zu diesem Zeitpunkt herrscht am Boden hoher Luftdruck. Mit der Abkühlung der Atmosphäre nimmt die relative Luftfeuchtigkeit zu. Die Abnahme der Temperatur und die Zunahme der relativen Feuchtigkeit verläuft kontinuierlich bis zum nächsten Sonnenaufgang.
- e. Nächtliche Veränderungen des Luftdrucks: Erstaunlicherweise nimmt der Luftdruck nach 21 Uhr stark ab und erreicht um ca. 3 Uhr früh einen neuen Tiefstand. Danach steigt er bis ca. 9 Uhr vormittags wieder an. Dieser Verlauf des Luftdrucks ist meines Erachtens nicht meteorologisch erklärbar, sondern allenfalls physikalisch: Sehr regelmässige Wellenbewegungen tendieren offenbar dazu, bei ihrer Rückkehr in die Ausgangslage über das Ziel hinauszuschiessen. Diese Tendenz wird als Gibbssches Phänomen bezeichnet. Wenn dieses Phänomen die Druckunterschiede um ca. 3 Uhr und 9 Uhr morgens erklärt, müsste in diesem Zeitintervall ein Höhenwind nach Osten wehen, der die Druckunterschiede erzeugt. In

Bodennähe ist jedenfalls meinen Beobachtungen zufolge frühmorgens kein ausgeprägter oder alltäglicher Wind spürbar. Möglicherweise haben die nächtlichen Veränderungen des Luftdrucks auch mit der Land-Wasser-Verteilung in den Tropen und Subtropen zu tun, denn gemäss Dai 1999 befindet sich um Mitternacht ein relatives Hoch genau über dem nachts relativ warmen Atlantik, das sich in den nachfolgenden Stunden nach Westen bewegt.

Abbildung 1: Tagesverlauf der Bewegungen der Luftmassen über Cumarú. Dargestellt sind 48 Stunden. T = Tiefdruck; H = Hochdruck. Die Buchstaben a-e entsprechen der Beschreibung Seite 27, die roten Pfeile Luftbewegungen



Die Verteilung von Land und Wasser beeinflusst die Windrichtungen: Im Südsommer erwärmt sich die Atmosphäre über dem Land stärker als über dem benachbarten Meer im Norden und Osten. Die tägliche Luftwelle ist also über dem Kontinent höher als über dem Meer, und die Luftmassen im Grenzbereich zwischen Land und Wasser werden von ihrer Ostrichtung nach Nordosten abgelenkt.

Grundsätzlich läuft dieser Prozess täglich ab. Im Südsommer ist jedoch die Sonneneinstrahlung viel stärker. Der in Cumarú beobachtete Tagesverlauf des Luftdrucks entspricht genau der Beschreibung von Riehl (Seite 286f.). Leider liefert dieser Autor keine Erklärung für das Phänomen. Der soeben beschriebene Tagesverlauf des Luftdrucks entspricht auch weitgehend den Beobachtungen von Dai (1999). Er stellte zwei Hochdruckwellen fest, die täglich mit der Geschwindigkeit der Erdrotation um die Erde kreisen. Seinen Beobachtungen zufolge sollten diese um ca. 8 Uhr und um ca. 22 Uhr in Cumarú sein, also etwa eine Stunde später als tatsächlich beobachtet. Diese Differenz hängt möglicherweise damit zusammen, dass die Ortszeit von Cumarú nicht mit der brasilianischen Zeitzone identisch ist, oder auch damit, dass Dai nur Daten verwertete, die im 3-Stunden-Rhythmus erhoben worden waren. Dai's Daten zeigen, dass die Hochdruckwelle über dem Kontinent und im Südsommer stärker ist als über dem Meer und im Winter, auch ist feststellbar, dass die vormitternächtliche Hochdruckwelle schwächer ist als die vormittägliche und sich über der Landmasse Südamerikas abzuschwächen scheint. Allerdings liefert auch Dai keine plausible Erklärung für das Phänomen.

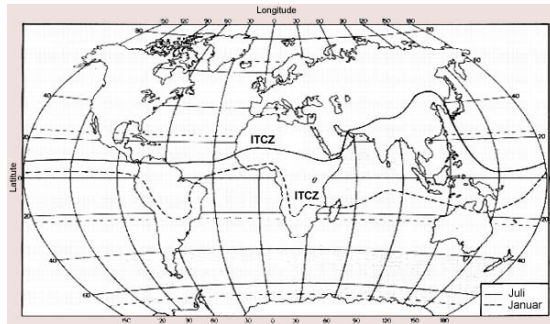
Jahresverlauf der Klima-Parameter

Der obgenannte tägliche Zyklus wird von den Auswirkungen der innertropischen Konvergenzzone überlagert. Der Nordosten Brasiliens ist während des gesamten Jahrs ausserhalb dieser Zone, jedoch im Einflussbereich der an die Konvergenzzone angrenzenden Gebiete. Wir können zwischen der Situation im Winter und im Sommer unterscheiden:

Im Südsommer führt die innertropische Konvergenzzone im Norden und Westen normalerweise um den Nordosten Brasiliens herum. Ihre Lage wird hauptsächlich von der Meerestemperatur bestimmt. Der Nordosten selber steht unter dem Einfluss der Fallwinde, die teilweise vom Amazonasbecken her kommen. Da diese Winde vorher teilweise nicht über das Meer, sondern über warme Landmasse geströmt sind, hatten sie weniger Gelegenheit, sich mit Feuchtigkeit zu sättigen, verloren mehr

Feuchtigkeit in der innertropischen Konvergenzzone und wärmen sich beim Niederfallen über dem Nordosten Brasiliens stärker auf. Daraus resultieren trockene Winde im Nordosten während des Südsommers. Die seltenen Regenereignisse im Sommer sind wahrscheinlich mehrheitlich auf Ausläufer von Kaltluftfronten zurückzuführen, die das sommerliche Regenregime in Bahia bestimmen und manchmal bis nach Cumarú vorstossen.

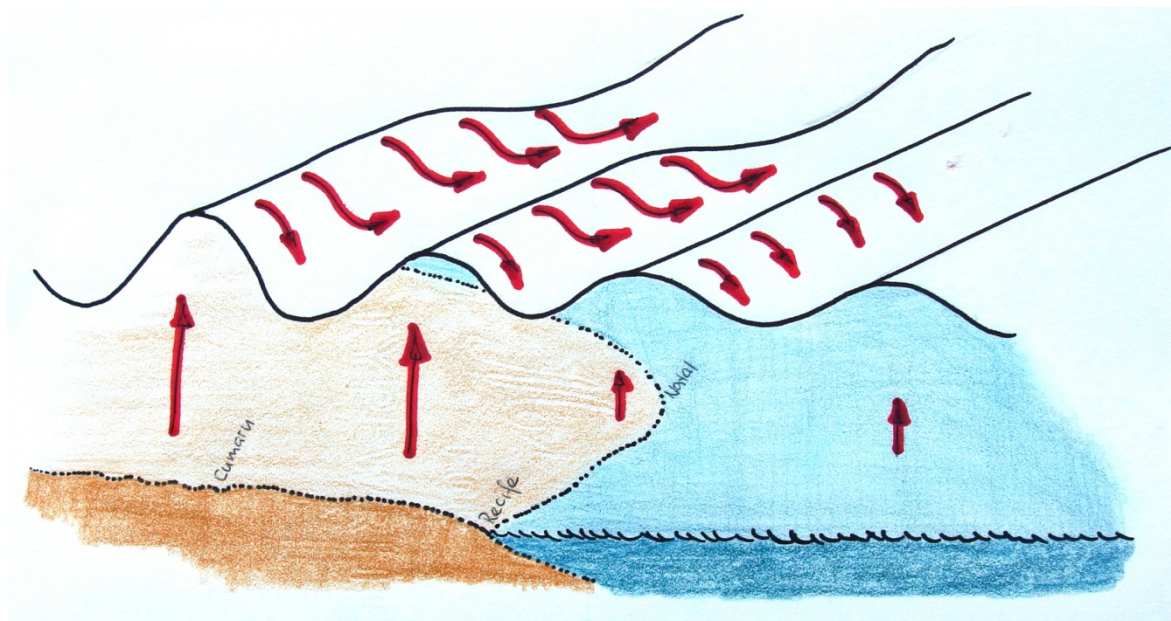
Abbildung 2: Lage der Innertropischen Konvergenzzone im Sommer und im Winter



Im Südwinter entfernt sich die innertropische Konvergenzzone vom südamerikanischen Kontinent Richtung Norden. Die relativ trockenen Winde, die im Sommer vom Amazonasbecken her kommen, verlieren im Nordosten Brasiliens langsam ihre Kraft und werden ersetzt durch feuchtere Winde vom Atlantik her. Im Winter liegt die innertropische Konvergenzzone Brasiliens vollständig über dem relativ warmen Atlantik.

Die Winde werden im Winter umso weiter nach Süden getragen, weil die Atmosphäre über Land tagsüber weniger stark aufgewärmt wird als im Sommer und nachts stärker abkühlt. Dadurch entsteht in den oberen Luftschichten über der Landmasse eine Senke, in die die feuchten und relativ warmen Winde der innertropischen Konvergenzzone vor allem nachts einfallen, sich mit der lokalen Atmosphäre mischen und Regen verursachen. In Cumarú fallen die regenreichsten Monate mit der Zeit zusammen, in der die innertropische Konvergenzzone über dem Meer liegt, und mit der Zeit der geringsten lokalen Sonneneinstrahlung. Die Regenzeit beginnt in den vom Meer entfernten Regionen des Nordostens früher, weil sich der Mangel an Sonneneinstrahlung desto früher auswirkt, je kontinentaler das Klima ist.

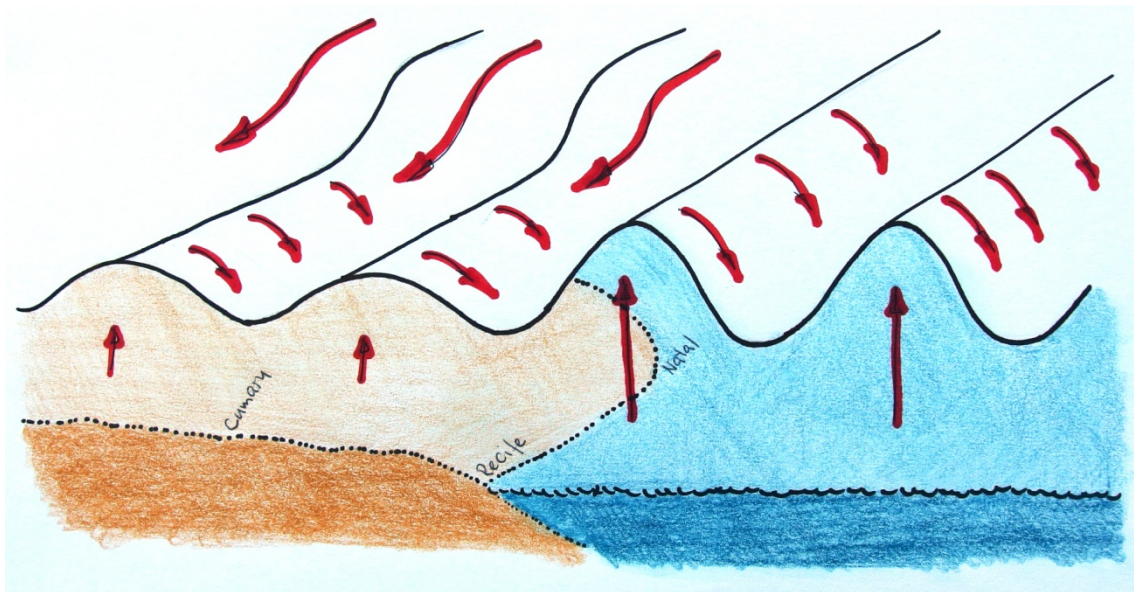
Abbildung 3: Luftdruck und Luftbewegungen über dem Nordosten Brasiliens im Sommer



Die obgenannte Theorie erklärt die Beobachtung von Hastenrath, dass die anormalen Wetterereignisse in Guiana umgekehrt seien wie jene im Nordosten Brasiliens. Wenn die Hypothese stimmt, müsste es im Winter vor allem nachts oder am frühen Morgen regnen. Leider ist der jeweilige Beginn der Regenereignisse in Cumarú nicht gebührend beachtet worden. Immerhin erwähnt Ramos 1975, dass sich östlich von Petrolina die winterlichen Regenfälle vorwiegend nachts und frühmorgens ereignen.

Die feuchten Luftmassen, die im Winter von Norden her in den Nordosten Brasiliens einfallen,

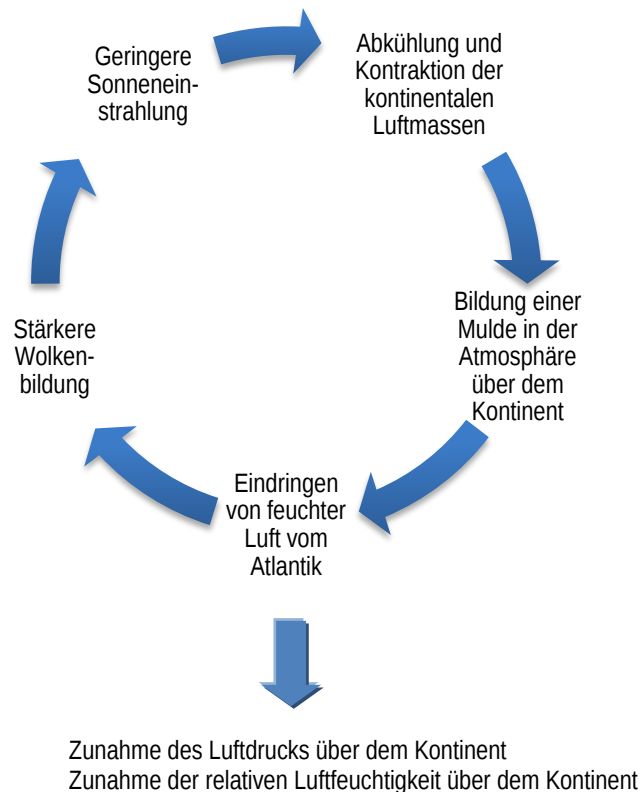
Abbildung 4: Luftdruck und Luftbewegungen über dem Nordosten Brasiliens im Winter



erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Regenfällen. Je feuchter die Luft, desto grösser die Regenwahrscheinlichkeit. Wahrscheinlich ist jedoch das Zusammentreffen zweier Faktoren notwendig, um eine regenbegünstigende Situation zu schaffen: Einerseits das Eindringen feuchter Luftmassen vom Atlantik durch die Windmaschine der innertropischen Konvergenzzone und durch die Atmosphärensenke über dem kalten Kontinent, andererseits eine ausreichend hohe Luftfeuchtigkeit der lokalen Luftmassen über dem Kontinent. Es ist zu vermuten, dass ein beträchtlicher Teil der lokalen Regen aus Wasser bestehen, das in benachbarten Regionen während des Vortags verdunstet ist.

Die sich während der Regenzeit verändernden Prozesse sind im folgenden Fluxogramm dargestellt:

Grafik 13: Veränderungen der klimatischen Situation in Cumaru während des Winters:



Im Winter steht Cumaru nicht nur unter dem Einfluss der feuchten Luftmassen von Norden, sondern auch unter jenem der Passatwinde, die von Südosten in den Nordosten Brasiliens gelangen und das Klima in der Küstenregion bestimmen. Mit der grössten Regenmenge in den Monaten Mai bis Juni ist Cumaru in der gleichen Familie ähnlicher Regenregimes gemäss dem "Atlas pluviométrico do Brasil" (1948) wie küstennahe Städte wie Maceió-AL oder Escada-PE.

Geringe Regenmengen werden im Boden nur kurze Zeit gespeichert. In der Regel verdunstet das Wasser innert der ersten zwei Tagen nach einem Regenereignis. Ich habe festgestellt, dass ein Millimeter Regen höchstens einen Zentimeter in den Boden eindringt. Vermutlich sind Regenereignisse von weniger als 15 mm für Pflanzen kaum verfügbar und verdunsten innert einem oder zwei Tagen. Diese Verdunstung ist hauptverantwortlich für die Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit in der Zeit nach einem Regenereignis. Ist die Regenmenge sehr gross, wird ein Teil des Wassers über Bäche und Flüsse aus dem Gebiet weggeführt und steht für die Verdunstung vor Ort nicht mehr zur Verfügung. Ein kleiner Teil dieses Wassers verlagert sich in tiefer liegende Bodenschichten oder wird in Biomasse eingebaut. Von da erfolgt die Rückgabe an die Atmosphäre langsamer. In diesem Zusammenhang möchte ich auf die Bedeutung der Vegetation und der Speicherkapazität des Bodens aufmerksam machen: Eine felsige Oberfläche ohne Vegetation vermag kaum Wasser zurückzuhalten, wird zudem während des Tags sehr heiss und kühlt während der Nacht stark ab. Tiefgründige Böden und dichte Vegetation vermögen viel Wasser zu speichern, verlangsamen die Rückgabe des erhaltenen Wassers an die Atmosphäre, verlangsamen den Wind und verringern Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen. Je dichter die Vegetation und je tiefgründiger der Boden, desto ausgeglichener das Klima und desto regelmässiger die Verteilung der Regenereignisse.

Ich vermute einen engen Zusammenhang zwischen den klimabeeinflussenden Faktoren des Amazonasbeckens und dem Klima des Nordostens. Vor allem im Sommer führt die innertropische Konvergenzzone Luftmassen des Amazonasbeckens direkt in den Nordosten. Daher gilt: Je besser das Amazonasbecken die Atmosphäre mit Feuchtigkeit zu versehen vermag, desto mehr Wasser bleibt für den Nordosten übrig. Gemäss Hastenrath (S. 353) sind dabei die Bodenfeuchte, die Rauheit und die Rückstrahlung der Geländeoberfläche hauptmassgebend. Diese Eigenschaften wiederum werden von der Vegetation wesentlich beeinflusst: Sie speichert Wasser, erhöht die Verdunstungsoberfläche, bremst den Wind und vermindert die Rückstrahlung. Auch Wasserflächen haben positive Auswirkungen auf das Klima, weil sie Wasser verdunsten und die Temperaturen ausgleichen (vgl. Riehl S. 280 ff).

Es ist auch zu vermuten, dass eine starke Relation zwischen der Meerestemperatur im Norden des Nordostens und der Regenmenge im Nordosten besteht: Je wärmer das Meer, desto weniger wandert die innertropische Konvergenzzone im Winter nach Norden, desto mehr Wasser verdunstet in der Nähe Brasiliens, desto grösser die Temperaturunterschiede zwischen Land und Wasser, desto grösser also die Regenmenge.

4.3. Wettervorhersagen

Die gesammelten meteorologischen Daten erlauben folgende Schlussfolgerungen:

1. Der Beginn der Regenzeit fällt in Cumaru mit einem Rückgang der frühmorgendlichen Temperatur um über 0.5° C und einem Anstieg des Luftdrucks um 1.5 hPa während mehrerer Tage zusammen.
2. Wenn in der Trockenzeit der frühmorgendliche Luftdruck innert 3 Tagen um über 2.5 hPa abnimmt, die frühmorgendliche relative Luftfeuchtigkeit in der gleichen Periode um über 5 % sinkt, und zudem am 3. Tag die frühmorgendliche Lufttemperatur um über 1° C sinkt, so sind dies Anzeichen für einen sommerlichen Regen, bedingt durch eine aus dem Süden herannahende Kaltfront.

4.4. Dimensionierung von Zisternen

Wer eine Zisterne baut, um Regenwasser zu speichern, will wissen, wie gross die Zisterne im Verhältnis zur Dachfläche sein soll, damit möglichst wenig Baumaterial und Wasser verloren gehen. Mit den erhobenen Daten ist es möglich, die ideale Grösse von Zisternen zu berechnen:

Eine Zisterne, die auch die stärksten Niederschläge zu fassen vermag, müsste etwa 400 Liter pro Quadratmeter horizontale Fassungsfläche betragen. Ein Beispiel: Ein Haus mit einer Dachfläche von 100 m² bräuchte ein Zisternenvolumen von 40 m³ (ein Würfel mit einer Seitenlänge von 3.50 m). Auf diese Weise könnten täglich 400 Liter Wasser entnommen werden. Kleinere Zisternen würden bei einem Regenereignis wie jenem vom 28. April bis zum 5. Mai 2011 oder jenem vom 15. bis zum 18. Juni 2010 überlaufen. Wer also eine kleinere Zisterne baut, dimensioniert sie nicht aufgrund des Angebots an Regen, sondern aufgrund anderer Kriterien, zum Beispiel des Wasserbedarfs, der Platzverhältnisse, Baukosten etc. Um nicht unnötigerweise Wasser zu verschwenden, ist es wichtig, die Zisterne im richtigen Moment zu reinigen, also wenn sie fast leer ist oder zu Beginn der Regenzeit. Empfehlenswert ist es daher, das Zisternenvolumen in zwei individuelle, aber mit einem verschliessbaren Rohr verbundene Zisternen aufzutrennen, damit zur Reinigung einer Zisterne das Wasser in die andere Zisterne gepumpt werden kann. Ebenfalls empfehlenswert ist es, das erste (verschmutzte) Regenwasser nach langen Trockenperioden abzuleiten (dafür gibt es einfache, preisgünstige halbautomatische Installationen) und das gesamte Regenwasser beim Zisterneneingang durch ein Sieb laufen zu lassen, das bündig ins Rohr eingepasst wurde. Das Aussetzen von ein paar kleinen Fischen ("Piabas") in jeder Zisterne verhindert das Wachstum von Mückenlarven. Schliesslich empfehle ich, in jede Zisterne eine ca. 2 cm dicke Isoporplatte schwimmen zu lassen, auf die sich allfällig hineinfallende Landtiere retten werden und damit das Wasser nicht verschmutzen.

5. Verwendete Literatur:

- Dai Aiguo, Wang Junhong, **Diurnal and Semidiurnal Tides in Global Surface Pressure Fields**, 16 February 1999, in: Journal of the Atmospheric Sciences, Volume 56, Seiten 3874-3891
- Dantas Marciano, **Fatores que contribuem para as chuvas no Nordeste**, 26 de dezembro de 2012: <http://professormarcianodantas.blogspot.ch/2012/12/fatores-que-contribuem-para-as-chuvas.html>
- Estados Unidos do Brasil, Ministério da Agricultura, Departamento da Produção Mineral, Divisão de Águas, Secção de hidrologia, **Átlas pluviométrico do Brasil** (1914-1938), Boletim no. 5, 1948
- Hamilton Kevin, Ryan Steven C., Ohfuchi Wataru, **Topographic effects on the solar semidiurnal surface tide simulated in a very fine resolution general circulation model**, in: Journal of geophysical research, Vol. 113, D17114, 2008
- Hastenrath Stefan, **Climate and circulation of the tropics**, D. Reidel Publishin company, Dordrecht/Boston/Lancaster/Tokyo
- Henner Marco, **Der Jahresverlauf der ITC (ITCZ)**: https://www.youtube.com/watch?v=yBScI_UpGvQ
- Kägi Bruno, **Dados meteorológicos de Cumaru**, Anos 2009-2012 (unveröffentlicht)
- Kousky Vernon E., **Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil**, Instituto de Pesquisas Espaciais INPE, conselho Nacional de Desenvolvimento científico e tecnológico CNPq, São José dos Campos, São Paulo, Brazil, in: Monthly weather Review, volume 108, 1979
- Kousky Vernon E., Gan Manoel Alonso, Instituto de Pesquisas Espaciais INPE, Conselho Nacional de Desenvolvimento científico e tecnológico CNOPqm São José dos Campos – SP, Brazil, **Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic**, 1981
- Kousky, Vernon E., **Frontal Influences on Northeast Brazil**, Instituto de Pesquisas Espaciais INPE, conselho Nacional de Desenvolvimento científico e tecnológico CNPq, São José dos Campos, São Paulo, Brazil, in: Monthly weather Review, volume 107, 1979
- Liebmann Brant, Kiladis George N., Allured Dave, Vera Carolina S., Jones Charles, Carvalho Leila M.V., Bladé Ileana, Gonzáles Paula L.M., **Mechanisms Associated with large Daily Rainfall Events in Northeast Brazil**, in: Journal of Climate, volume 24, 2010
- Lyra Gustavo B., Oliveira-Júnior José F., Zeri Marcelo, **Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil**, International Journal of Climatology, 26 of February 2014
- Mishra S. K., Brahmananda Rao V., Sergio H. Franchito, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brazil, **Genesis of the Northeast Brazil Upper-Tropospheric Cyclonic Vortex: A Primitive Equation Barotropic Instability Study**. April 2007
- Ramos, R. P. L., 1975, **Precipitation characteristics in the northeast Brazil dry region**. J. Geophys. Res., 80, 1665-1678
- Riehl Herbert, **Climate and Weather in the Tropics**, Academic Press, London, New York, San Francisco 1979
- Schwerdtfeger Werner, World Survey of climatology Volume 12, **Climates of Central and South America**, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York 1976
- University of Hawaii at Manoa, **Why Atmospheric Pressure Peaks At 10am And 10pm In The Tropics**. ScienceDaily. ScienceDaily, 14 December 2008. <www.sciencedaily.com/releases/2008/12/081203092437.htm>.

6. Nützliche Links zum Thema:

- <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/>
- Warum hoher Luftdruck um 10 Uhr und um 22 Uhr in den Tropen: <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/12/081203092437.htm>
- Gezeitenwind: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gezeitenwind>
- Rechteckschwingung: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rechteckschwingung>
- Überschwingen: <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberschwingen>

7. Korrespondenz:

Anfrage vom 30.11.2014 an die Klimagruppe der Universität Bern und ans Instituto nacional de Meteorologia INMET:

Sehr geehrte Damen und Herren!

Während 4 Jahren habe ich die Wetterdaten in Cumaru notiert, um zu verstehen, welche entscheidenden Faktoren das lokale Klima prägen. Bei der Auswertung dieser Daten haben sich zwei Fragen ergeben, die es mir nicht gelungen ist zu beantworten. Als ehemaliger Biologiestudent der Uni Bern wende ich mich daher an die Forschungsgruppe Klimatologie mit der Frage, ob Sie jemanden kennen, der mir weiterhilft, oder ob es allenfalls in ihrer Bibliothek ein Buch gibt, der meine Fragen beantwortet. Zur Illustration meiner Fragen sende ich Ihnen im Anhang als pdf-Dokument einen Auszug meines noch unfertigen Berichts mit zwei Grafiken (Tagesverlauf des Luftdrucks; Temperatur (rot), Luftdruck (schwarz), relative Luftfeuchtigkeit (grün) und tägliche Regenmenge (blau)). Für weitere Auskünfte stehe ich natürlich gerne zur Verfügung.

Hier meine Fragen: Cumaru ist eine Ortschaft im semiariden Nordosten Brasiliens, im Staat Pernambuco, ca. 8 Grad südliche Breite und ca. 100 km vom Südatlantik entfernt. Ich habe festgestellt, dass der Luftdruck täglich zweimal ansteigt und zweimal absinkt, jeweils fast zu identischen Tageszeiten: Der Druck ist tief ca. um 3 Uhr und um 15 Uhr, hoch ca. um 9 Uhr und um 21 Uhr. Vor allem nachmittags weht ein Wind von Osten her. Können Sie mir erklären, wie diese Druckverhältnisse zustandekommen? Zur Erklärung habe ich folgende Vermutung: Nach Sonnenaufgang wärmt sich die Atmosphäre auf und erzeugt bis ca. 14 Uhr in den oberen Luftschichten eine Welle, die infolge der Erdbewegung nach Osten verfrachtet wird und dort ein Hochdruckgebiet erzeugt (um 21 Uhr). In den unteren Luftschichten versucht der Wind, diese Druckverhältnisse wieder auszugleichen (Wind am Nachmittag). Am Nachmittag und Abend kühlt sich die Atmosphäre wieder ab, womit ein Wellental entsteht, welches von der Welle aufgefüllt wird. So weit so gut. Ich verstehe jedoch nicht die Entstehung des Bodentiefs um 3 Uhr morgens und des Bodenhochs um ca. 9 Uhr. Können Sie mir da weiterhelfen?

Und noch eine zweite Frage: Jeweils ca. 2-3 Tage vor den seltenen Regengüssen während der Trockenperiode, die von September bis März dauert, sinken Druck und Luftfeuchtigkeit stark ab, steigen während des Regenereignisses aber wieder an (vgl. Grafik im Anhang). Warum?

Besten Dank im Voraus für Ihre Hilfe!

Mit freundlichem Gruss: Bruno Kägi

Antwort der Klimagruppe der Universität Bern:

Sehr geehrter Herr Kägi

Bitte entschuldigen Sie die späte Antwort. Was Sie beobachtet haben, beobachtet man in den ganzen Tropen. Hier eine Erklärung: <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/12/081203092437.htm>. Ich kann Ihnen auch das paper von Dai (1999) empfehlen, wo gezeigt wird, dass Nord-Brasilien besonders grosse Luftdruckschwankungen hat. Die Beobachtungen von sinkendem Druck und abnehmender Luftfeuchtigkeit vor einem Event weisen darauf hin, dass die Niederschlagsereignisse im Zusammenhang mit kalten Fronten stehen. In der Tat, Kousky (1979) hat das schon beschrieben. Ich glaube, diese Studie könnte Sie interessieren, da die gleichen Phänomene, die Sie identifiziert haben, dort zu sehen sind. Weiter habe ich die Paper von Lyra et al. (2014) und von Liebmann et al. (2011) angehängt, die sich mit Niederschlagsereignissen und -extremevents im Nordosten von Brasilien befassen. Es ist schön zu sehen, dass, wie erwartet, die kalten Fronten mit den bekannten Wellenzügen der mittleren Breiten zu tun haben. Es wäre interessant, Wind-Daten zu haben. Ich vermute, dass vor solcher kalten Fronten der Wind aus einer anderen Richtung kommt, im Vergleich zu der Meeresbrise, welche bestimmt feuchter ist und in "ruhigen" Tagen dort weht. Vielleicht sind es auch kleine "Berge" (bis zu 1000m) westlich von Cumaru, die einen Föhn-effekt verursachen können. Aber das ist nur Spekulation... Vielleicht gelangen Sie an weitere Informationen

mithilfe von anderen Stationen in der Umgebung? z.B.

<http://www.wunderground.com/history/airport/SBUF/2014/11/2/MonthlyHistory.html> oder

<http://www.wunderground.com/history/airport/SBPL/2014/11/2/MonthlyHistory.html>. Die erwähnten Studien finden Sie im Anhang.

Ich hoffe, das Ihnen diese Informationen weiterhelfen werden.

Freundliche Grüsse

Céline Dizerens, Junior Assistant

University of Bern

Climatology Group

Hallerstrasse 12

CH - 3012 Bern

Tel. ++41 (0)31 631 8880

Antwort des INMET:

Caro Bruno,

O ar é um fluido, e assim como o oceano, sofre os efeitos da força de atração gravitacional do Sol e da Lua. Enquanto no oceano temos o fenômeno das marés, na atmosfera o mesmo fenômeno ocorre, e chama-se maré barométrica. Por isso a variação diuturna da pressão, muito bem percebida por V.S^a.

Quanto a 2^a questão: É natural a pressão da atmosfera cair antes das chuvas, devido à mudança de circulação dos ventos. Pressão é força sobre área, daí uma região com alta pressão está sob o domínio de um ar descendente (exercendo força para baixo, portanto na superfície); uma região com baixa pressão, o ar está na ascendência, daí diminuindo a força na superfície e provocando baixa pressão que, em geral, está associada a instabilidades atmosféricas, portanto em condições de mudar o tempo e provocar chuvas. Quanto à variação da umidade, provavelmente a mudança na circulação dos ventos provoque a variação da umidade relativa.

Atenciosamente,

Assessoria de Comunicação

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA